

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Porovnání technologie výroby vybrané
součásti konvenční a nekonvenční
technologií**

Production Technology Comparation of
Choiced Part by Conventional and Non-
Conventional Technology

Student:

Jaroslav Sloupský

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Robert Čep, Ph.D.

Ostrava 2020

Zadání bakalářské práce

Student: **Jaroslav Sloupský**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: Porovnání technologie výroby vybrané součásti konvenční a
nekonvenční technologií
Production Technology Comparison of Chociced Part by Conventional
and Non-Conventional Technology
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky.
2. Popis nekonvenční technologie výroby.
3. Návrh výroby zadané součásti konvenční technologií.
4. Návrh výroby zadané součásti nekonvenční technologií.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

BRYCHTA, Josef; ČEP, Robert; NOVÁKOVÁ, Jana; PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Technologie II – 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TU Ostrava, 2007, 126 s. ISBN 978–80–248–1641–8.
BRYCHTA, Josef; ČEP, Robert; NOVÁKOVÁ, Jana; PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Technologie II – 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TU Ostrava, 2008, 150 s. ISBN 978–80–248–1822–1.
MRKVICA, M. *Přípravky a obráběcí nástroje: 1. díl, Řezné nástroje*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava. 2006. ISBN 80–7078–941–7.
NESLUŠAN, Miroslav; TUREK, Stanislav; BRYCHTA, Josef; ČEP, Robert; TABAČEK, Marián. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. 343 s. ISBN 978–80–8070–711–8.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Robert Čep, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petruš, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020

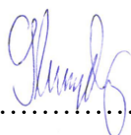


.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§ 60 – školní dílo);
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Jaroslav Sloupský

Adresa trvalého pobytu autora práce: Drahanovice 99, 783 43 Drahanovice

Anotace bakalářské práce

SLOUPSKÝ, J. *Porovnání technologie výroby vybrané součásti konvenční a nekonvenční technologií: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 68 s. Vedoucí práce: Čep, R.

Bakalářská práce se zabývá porovnáním konvenčních a nekonvenčních metod obrábění. V teoretické části práce je popsána metoda řezání laserem, její historie, vznik záření, konstrukce zařízení včetně rozdělení a aplikace laserů v průmyslu. V praktické části je navržena součást z konstrukční oceli a pro její výrobu je vybrána metoda obrábění, a to frézování a řezání laserem. Po výrobě vzorků jsou porovnány naměřené rozměrové hodnoty, drsnosti jejich povrchů a srovnání časové náročnosti s cenami technologií pro určené výrobní série. V závěru práce jsou shrnuty výhody a nevýhody technologií se stanovením vhodnější technologie.

Annotation of bachelor thesis

SLOUPSKÝ, J. *Production Technology Comparison of Choiced Part by Conventional and Non – Conventional Technology: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2020, 68 p. Thesis head: Čep, R.

This bachelor thesis is about comparison of choiced part by conventional and non-conventional technology. The theoretical part describes the method of laser cutting, its history, the origin of radiation, the design of equipment, including the distribution and application of lasers in industry. The practical part is focused on designing a component made of structural steel and selecting a machining method for its production, namely milling and laser cutting. After the samples are produced, there is a comparison of measured dimensions, the roughness of their surface and final prices of used technologies for production series. In conclusion, there is a summary of the advantages and disadvantages of technology with the determination of more suitable technology.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	8
Úvod.....	10
1. Nekonenční technologie výroby	11
1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění	11
2. Technologie obrábění laserem	12
2.1 Historie laseru	12
2.1.1 Hlavní mezníky ve vývoji laserové techniky	13
2.2 Vznik laserového paprsku.....	14
2.2.1 Stimulovaná emise.....	16
2.2.2 Spontánní emise.....	16
2.2.3 Relaxační přechody	16
2.2.4 Absorpce	16
2.3 Vlastnosti laserového záření	17
2.4 Konstrukce laserového zařízení	21
2.4.1 Rezonátor.....	21
2.4.2 Laserové médium	22
2.4.3 Budící zdroj	23
2.4.4 Chladicí zařízení	23
2.5 Rozdělení a klasifikace laserů.....	23
2.5.1 Pevnolátkové lasery	24
2.5.2 Plynové lasery	26
2.5.3 Polovodičové lasery.....	28
2.5.4 Kapalinové lasery	28
2.5.5 Nové druhy laserů.....	29
3. Aplikace laseru.....	31
3.1 Laserové řezání	31
3.2 Laserové svařování	32
3.3 Tepelné zpracování laserem.....	32
3.4 Laserové gravírování a popisování	33
3.5 Vrtání laserem.....	33
4. Proces řezání laserem.....	34
4.1 Parametry laserového řezání	36
4.1.1 Výkon laseru.....	36

4.1.2 Řezná rychlost	36
4.1.3 Geometrie tvaru trysky a tlak plynu	36
4.1.4 Poloha ohniska.....	37
4.1.5 Vzdálenost ohniska.....	38
4.1.6 Režim řezání a zapichování.....	38
4.2 Technologické plyny pro řezání laserem	39
4.2.1 Kyslík	39
4.2.2 Dusík.....	39
4.2.3 Argon.....	39
4.2.4 Stlačený vzduch.....	39
4.3 Kvalita povrchu.....	40
4.3.1 Drsnost povrchu.....	40
4.3.2 Úchylka kolmosti, úchylka úhlu „u“	41
4.3.3 Skluz „n“	42
4.3.4 Natavení horní hrany, r.....	43
4.4 Vady při laserovém řezání	43
4.4.1 Šířka řezné spáry	43
4.4.2 Výskyt otřepů na spodní straně	44
5. Experimentální část práce	45
5.1 Návrh výroby součásti konvenční technologií.....	47
5.2 Návrh výroby součásti nekonvenční technologií.....	52
6. Technicko-ekonomické zhodnocení	57
6.1 Porovnání rozměrové přesnosti součástí.....	57
6.1.1 Měření frézovaného vzorku.....	57
6.1.2 Měření vzorku řezaného laserem.....	59
6.1.3 Porovnání výsledků rozměrových měření	61
6.2 Srovnání drsnosti povrchů	63
6.3 Porovnání ceny výroby součástí	65
Závěr.....	66
Seznam použité literatury	67

Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Název	Jednotka
a	tloušťka řezu	[mm]
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý	[-]
b	úhel šikmého řezu	[°]
CNC	počítačem řízený obráběcí stroj	[-]
CO ₂	oxid uhličitý	[-]
Cr ³⁺	kation chromitý	[-]
cw	kontinuální režim laserového svazku	[-]
ČSN EN ISO	Mezinárodní norma	[-]
Da	zmenšení tloušťky řezu	[mm]
d _m	průměr paprsku na výstupu rezonátoru	[mm]
E	energetická hladina	[-]
Er:YAG	yttrium-aluminium-granátu, dopovaný erbiem	[-]
h	Planckova konstanta	[J·s]
He	Helium	[-]
k	Boltzmannova konstanta	[J·K ⁻¹]
l	vlnová délka záření	[nm]
L	vzdálenost mezi zrcadly	[nm]
l _c	mezní vlnová délka	[μm]
ln	celková měřená délka drsnosti	[mm]
l _w	vlnová délka záření	[nm]
n	přirozené číslo	[-]
n	skluz paprsku	[mm]
N ₁	počet částic na hladině s menší energií	[-]
N ₂	počet částic na hladině s větší energií	[-]

Nd:Yag	ytrium-aluminium-granátu, dopovaný neodymem	[-]
Nd:YLF	lithium – ytrium – fluoridu, dopovaný neodymem	[-]
Ne	Neon	[-]
π	Ludolfovo číslo	[-]
Ra	střední aritmetická úchylka profilu	[μm]
Rz	největší výška profilu	[μm]
T	teplota soustavy	[K]
TEM	transverzální elektromagnetický mód	[-]
TEM ₀₀	transverzální elektromagnetický mód nejnižšího řádu	[-]
TEM _{mn}	transverzální elektromagnetický mód v kartézských souřad.	[-]
TEM _{pl}	transverzální elektromagnetický mód ve válcových souřad.	[-]
u	úchylka kolmosti	[mm]
UV	ultrafialové záření	[nm]
V	frekvence vyzářeného fotonu	[s ⁻¹]
v	frekvence vyzářeného fotonu	[s ⁻¹]
VBD	vyměnitelné břitové destičky	[-]
Θ	velikost divergence	[mrad]

Úvod

Cílem této práce je komparace vybrané součásti při obrábění konvenční a nekonvenční technologií, jejich výhody, nevýhody a využití v praxi včetně popisu. Praktická část práce byla vypracována ve spolupráci se společností AŽD Praha s.r.o. s pobočkou v Olomouci a se společností SLOUPSKÝ s.r.o. V praxi převládá výroba nekonvenčními metodami, a to pro jejich vysokou přesnost obrobku a výrobní rychlost.

První kapitola této práce popisuje nekonvenční metody obrábění, rozdíly oproti konvenčním metodám, výhody nekonvenčních metod v případě těžkoobrobitelných materiálů a z hlediska ekonomiky a kvality obrobené součásti. V návaznosti na popis je v práci uvedeno základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění.

Druhá kapitola je zaměřena na technologii obrábění laserem. V úvodu kapitoly je věnována pozornost historii a pokroku laseru. Dále je rozebrán vznik laserového paprsku a vlastnosti laserového záření. V závěru kapitoly je popsán řezací stroj, konstrukce laserového zařízení a následně rozdělení dle daných kritérií a klasifikace laserů.

Ve třetí kapitole se pojednává o aplikacích laserů ve strojírenství a jejich progresivním způsobu využití se zaměřením zejména na řezání, svařování, vrtání a značení.

Čtvrtá kapitola zahrnuje celý proces řezání laserem, a to především parametry laserového řezání, technologické plyny pro řezání a výslednou kvalitu povrchu po řezání včetně povrchových vad obrobku.

V páté kapitole je obsažena experimentální část práce, která obsahuje zvolení materiálu součásti, náhled na základní tvar vzorku a návrh výroby součásti konvenční i nekonvenční technologií. K práci jsou přiloženy také technologické postupy při frézování, seřizovací plány a technologické tabulky pro řezání laserem.

Poslední kapitola se věnuje technicko-ekonomickému zhodnocení obrobených součástí. Nejprve jsou porovnány rozměrové přesnosti součástí včetně měrných protokolů a grafických znázornění. V další části kapitoly je porovnána drsnost povrchů obou vzorků a na závěr jsou srovnány ceny výrobků konvenční i nekonvenční technologie v různých sériích.

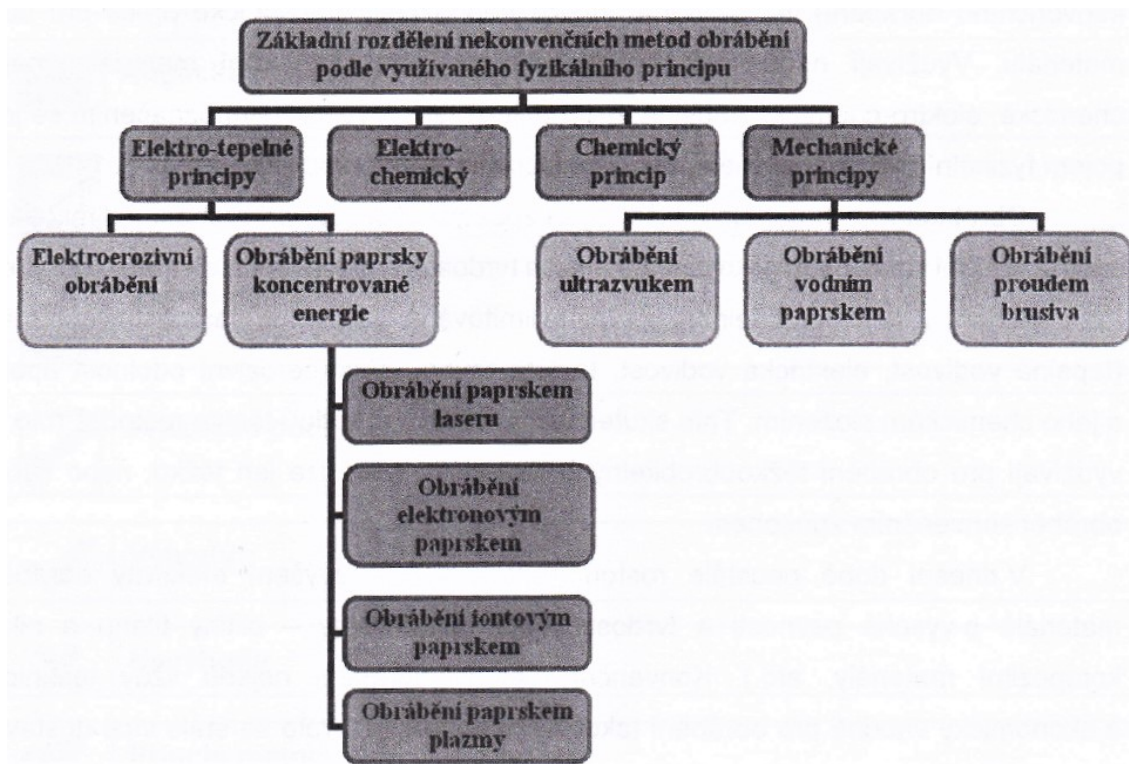
1. Nekonvenční technologie výroby

Nekonvenční metody obrábění jsou v dnešní době velmi technologicky i ekonomicky vzrůstajícími skupinami. Tyto metody nás však ve výrobě doprovází již desítky let. S postupným zvyšováním nároků na konstruktéry a technologie nátlak konkurence automaticky nutí pracovat s novými materiály a řešit složité problémy. Nekonvenční technologie výroby dosahují kratších výrobních časů a vysoké kvality obrobku, obzvláště při obrábění materiálů vysokých pevností. Stále častěji jsou nekonvenční metody používány v případech, kde jsou konvenční metody obrábění málo účinné, nevhodné anebo jimi nelze obrábět. Jejich hlavní rozdíl je v úběru třísky, kdy nedochází ke kontaktu nástroje s obrobkem. Nejsou tedy limitovány mechanickými vlastnostmi jako jsou pevnost a tvrdost. Nekonvenční technologie výroby využívají fyzikální principy (např. tepelné, mechanické, chemické, elektrochemické). [2]

U nekonvenčních metod obrábění je obrobitelnost z velké části omezena fyzikálními vlastnostmi materiálu (elektrická vodivost, tepelná vodivost, teplota tavení, elektroerozivní odolnost apod.) a jeho chemickém složení. [2]

1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Na základě fyzikálních principů lze rozdělit nekonvenční metody obrábění takto:



Obr. 1 Rozdělení nekonvenčních metod [2]

2. Technologie obrábění laserem

2.1 Historie laseru

Během druhé světové války se začaly používat radiolokátory (neboli radary), které pomocí odrazu elektromagnetických vln velmi malé vlnové délky umožňovaly zajišťovat polohu nepřátelských letadel. Po válce vývoj pokračoval a konstruktéři hledali způsob, jak zlepšit parametry mikrovlnných vysílačů a přijímačů. Fyzikové se vrátili k Einsteinově myšlence stimulované emise záření. Prakticky současně dosáhli úspěchu vědci v tehdejší Sovětské svazu a ve Spojených státech. V roce 1954 vznikly v moskevském Fyzikálním ústavu akademie věd SSSR (N. G. Basov a A. M. Prochorov) a na Kolumbijské univerzitě v New Yorku (Ch. H. Townes) první kvantové generátory mikrovlnného záření. Tyto přístroje dostaly jméno maser, odvozené z počátečních písmen názvu Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesilovač mikrovln pomocí stimulované emise záření). [9]



Obr. 2 N. G. Basov, A. M. Prochorov, Ch. H. Townes [9]

Základem maseru byla komůrka se čpavkovou náplní, vložená do silného elektrického pole. Molekuly čpavku tak v dutině získaly energii nutnou ke vzniku stimulované emise. Maser sloužil k zesilování velmi slabých mikrovlnných signálů nebo ke generování mikrovln. Hlavními výhodami maseru byla zejména nízká úroveň šumu a vysoká stabilita kmitočtu. Maser umožnil astronomům zesilovat i velmi slabé signály přicházející k nám z vesmíru. Stal se také nejpřesnějšími hodinami (tzv. atomové hodiny) s teoretickou odchylkou jedné vteřiny za několik miliónů let. [9]

Od čpavkového maseru už byl jen krůček k sestrojení kvantového zesilovače pracujícího místo mikrovln se stimulovanou emisí světla. V roce 1960 se to jako prvnímu podařilo Theodorovi Maimanovi, který získal první červené paprsky laserového světla. Jeho

kvantový generátor dostal jméno **Laser**. Prototyp laseru byl sice velmi primitivní, ale i dnešní nejmodernější a nejvýkonnější lasery vycházejí z jeho konstrukce. [9]

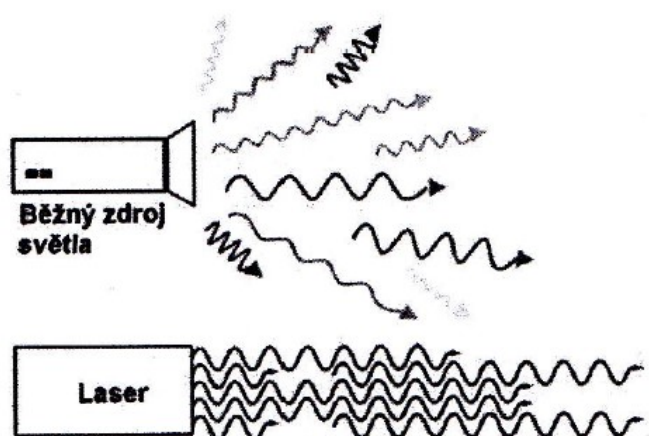
2.1.1 Hlavní mezníky ve vývoji laserové techniky

- **1917** Albert Einstein a jeho předpověď, že kromě absorpce a emise záření existuje stimulovaná emise, při níž dochází k zesílení světla procházejícího látkou.
- **1928** Poprvé byla stimulovaná emise pozorována R. Ladenburgem a H. Kopfermannem v plynu.
- **1940** Sovětský fyzik V. A. Fabrikant navrhl využít stimulovanou emisi v plynném prostředí k zesilování světla.
- **1947** Britsko-maďarský vědec D. Gabor vypracoval teorii holografie.
- **1954** Sověští fyzikové N. G. Basov a A.M. Prochorov a americký fyzik Ch. H. Townes položili základy novému fyzikálnímu oboru – kvantové elektronice. Byl sestrojen první maser, ve kterém docházelo ke vzniku mikrovlnného záření molekul čpavku.
- **1958** Američtí vědci A. L. Schawlow a jeho švagr Ch. H. Townes publikovali v odborném časopise Physical Review článek "Infračervený a optický maser". V něm navrhli konstrukci optického kvantového generátoru, později nazvaného "laser".
- **1960** A. Javan, W. Bennett a D. Herriott sestrojili první plynový laser, aktivní látkou byla směs hélia a neonu. Vlnová délka jeho světla byla 1150 nanometrů. Začal bouřlivý vývoj různých typů laserů a hledání jejich využití.
- **1960** Vznikly první polovodičové lasery využívající přechodu p-n (R. Hall). Musely být chlazeny kapalným dusíkem na teplotu -196°C .
- **1964** Basov, Prochorov a Townes obdrželi Nobelovou cenu za fyziku jako ocenění zásluh za vznik a rozvoj kvantové elektroniky.
- **1964** Kumar Patel sestrojil první výkonný laser s oxidem uhličitým jako aktivní látkou, vlnová délka záření 1060 nanometrů.
- **1964** První neodymový laser (Nd:YAG) uvedli do provozu J. F. Geusic a R. G. Smith.
- **1965** První chemický laser, ve kterém dochází k buzení energií uvolněnou při chemických reakcích.
- **1965** Pomocí laserového světla byly vytvořeny první hologramy (D. Gabor a další).

- **1971** I. Hayashi a M. Panish zkonstruovali první polovodičový laser pracující při pokojové teplotě.
- **1975** První excimerový laser s excitovanými molekulami xenonu.
- **1983** V USA byl uveden do provozu první excimerový laser pracující v ultrafialové oblasti (vlnová délka 193 nanometrů). [9]

2.2 Vznik laserového paprsku

Laserový paprsek je vlnění optického druhu, které patří do skupiny elektromagnetického záření. Od jiných druhů záření se odlišuje jen vlnovou délkou. Běžné světelné záření je vlnění, které obsahuje vlny nejrůznějších délek a frekvencí, spontánně vycházející různými směry. V laseru se poprvé podařilo vytvořit podmínky, ze kterých se ve vhodném aktivním prostředí pod vlivem určitého stimulujícího elektromagnetického záření spontánní emise potlačí na úkor emise vynucené stimulujícím zářením. Takto získané laserové záření je koherentní, může interferovat, je extrémně monochromatické a divergence záření je velmi malá při vysoké spektrální hustotě záření. Díky koherentnosti paprsku je možné soustředit záření pomocí optického systému na velmi malou plošku. [10]



Obr. 3 Záření běžného zdroje světla a laseru [2]

Podstatou laseru je, že elektromagnetická vlna určité frekvence vynucuje přechod elektronů z vyšší hladiny na nižší, čímž se posiluje původní vlna. Lasery jsou v podstatě transformátory energie relativně nižší kvality (tepelné, chemické, světelné a další) na energii s vyšší kvalitou – energii laserového záření. Z termodynamické terminologie lze říct, že laser je zařízení, které zmenšuje entropii soustavy, přičemž se spotřebuje určité množství energie.

Podle kvantové fyziky může molekula nebo atom přijmout (nebo vyžárit) energii jen v určitých nejmenších dávkách – kvantech. Ty jsou dané rozdílem mezi energetickými hladinami, které může elektron (atom, molekula) zaujmout. Vyjadřuje to Bohrovův vztah: [10]

$$E = h \cdot \nu$$

Kde:

E – energetický rozdíl mezi hladinami

h – Planckova konstanta

ν – frekvence vyzařeného fotonu

K tomu, aby došlo ke zvětšení počtu atomů na některé z vyšších energetických hladin, je potřebné vnější působení, které se nazývá čerpání. Na čerpání můžeme použít různé druhy energie (tepelnou, chemickou, optickou, elektrickou a další). Obsazení energetických hladin se řadí Boltzmannovým rozdělením. Po čerpání nastává porušení rovnováhy, které se nazývá inverze. [10]

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{h \cdot \nu}{k \cdot T}}$$

Kde:

N_1 – počet částic na hladině s menší energií [-]

N_2 – počet částic na hladině s větší energií [-]

k – Boltzmannova konstanta [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$]

T – teplota soustavy [K]

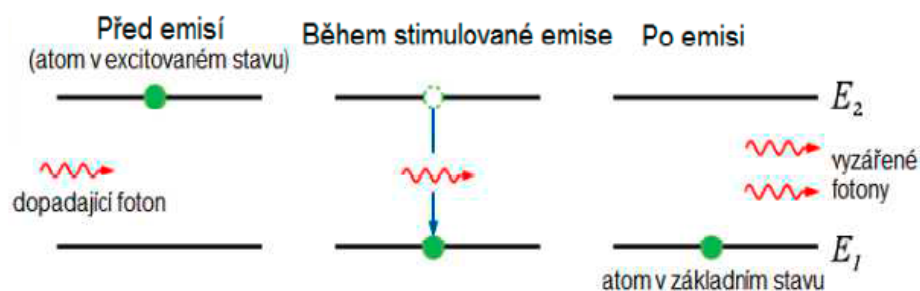
ν – frekvence vyzařeného fotonu [s^{-1}]

h – Planckova konstanta [$\text{J} \cdot \text{s}$]

Po načerpání nastává inverze, což je porušení rovnováhy. Elektrony (atomy, molekuly) zůstávají na metastabilní energetické hladině určitou dobu, přičemž může dojít k některým jevům. [10]

2.2.1 Stimulovaná emise

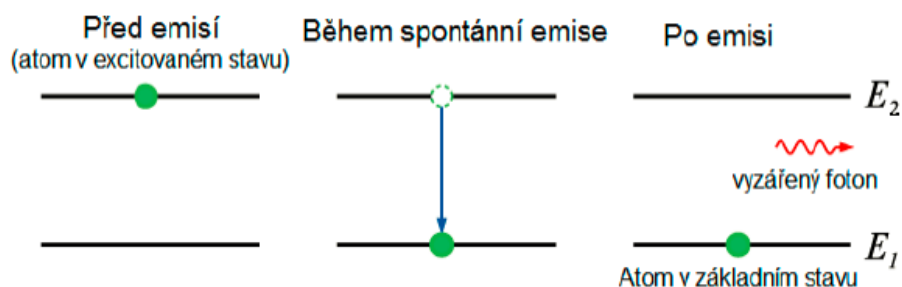
Je zářivý kvantový přechod z vyšší energetické hladiny na nižší, který je ale podmíněný existencí budoucího elektromagnetického záření. Charakteristikou stimulované emise je, že nabuzený atom nacházející se na vyšší energetické úrovni pod vlivem dopadajícího záření vyzařuje energii a přechází na nižší energetickou úroveň. [10]



Obr. 4 Princip stimulované emise [10]

2.2.2 Spontánní emise

Jde o zářivý kvantový přechod z vyšší energetické hladiny na nižší. Tento přechod nezávisí na působení vnějšího elektromagnetického záření. [10]



Obr. 5 Princip spontánní emise [10]

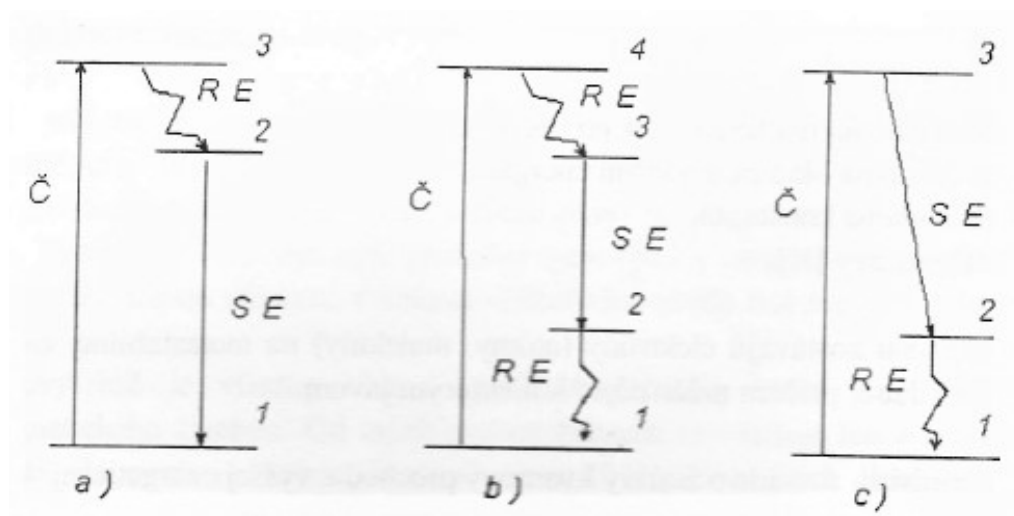
2.2.3 Relaxační přechody

Jsou to přechody vyvolané různými mechanismy (srážky částic).

2.2.4 Absorpce

Absorpce je pohlcení nebo zeslabení záření při jeho šíření aktivním prostředím. Podle způsobu čerpání, relaxace a stimulované emise máme různé systémy, které jsou dané použitým aktivním prostředím. Aktivním prostředím je myšlena pracovní látka (pevná, kapalná, plynná) v kvantových zesilovačích. Rozeznáváme dvou, tří, čtyř a více hladinové

systemy. Buzení může být přímé nebo nepřímé. Při nepřímém buzení je příjem energie potřebný na dosažení inverze zprostředkovaný jinou látkou než je aktivní látka. [10]



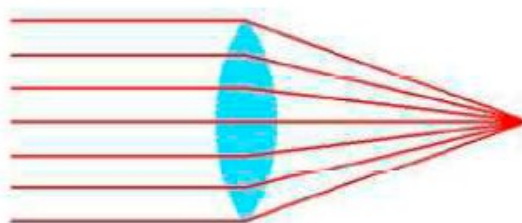
Obr. 6 Typy systémů dle čerpání [10]

a) Tříhladinový, b) čtyřhladinový, c) tříhladinový s přímým čerpáním inverzní hladiny,

(RE – relaxační přechody, SE – stimulovaná emise, Č – čerpání, 1,2,3,4 – energetické hladiny)

2.3 Vlastnosti laserového záření

Unikátnost laserového záření oproti elektromagnetickému záření, které vzniklo jiným způsobem, spočívá v řadě jeho vlastností. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří: [10]



Obr. 7 Fokuse laserového světla [6]

- **Monochromaticita** – Vyplyvá z podstaty jevu stimulované emise. Paprsek je v ideálním případě tvořený hlavně fotony stejné vlnové délky. Reálné generátory splňují tuto podmínku s velmi malými odchylkami. [10]
- **Směrovost** – Je podmíněná tím, že záření na výstupu z laseru na povrchu polopropustného zrcadla je koherentní (sfázované) na ploše, která je o dost větší než je vlnová délka záření. Jednou z charakteristik směrovosti je i prostorový úhel. V praxi se

neuvádí jako parametr prostorový úhel, nýbrž rovinný úhel divergence paprsku. Všeobecně lze určit velikost divergence Q v závislosti na vlnové délce λ_w a výstupního průměru paprsku d_m dle vztahu: [10]

$$\Theta = \frac{4 \cdot \lambda_w}{\pi \cdot d_m}$$

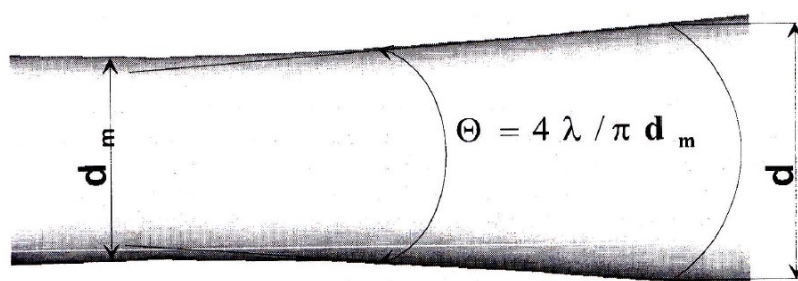
Kde:

Θ – velikost divergence [mrad]

π – Ludolfovo číslo [-]

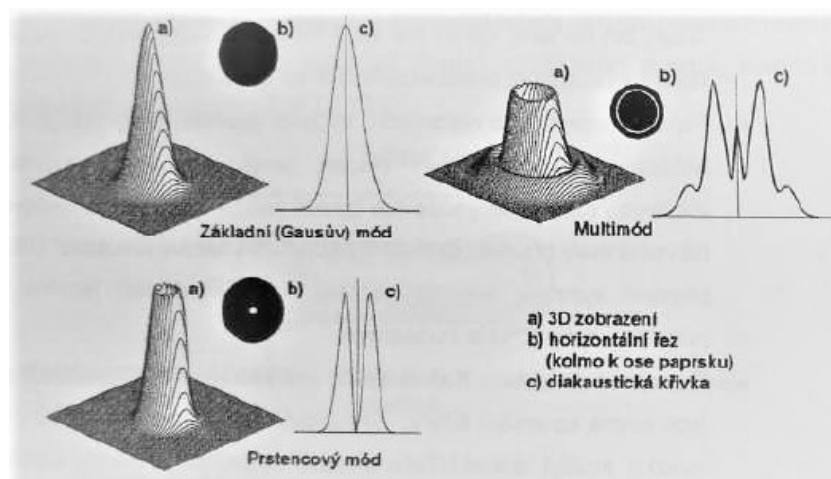
λ_w – vlnová délka záření [nm]

d_m – průměr paprsku na výstupu rezonátoru [mm]



Obr. 8 Fokuse laserového světla [6]

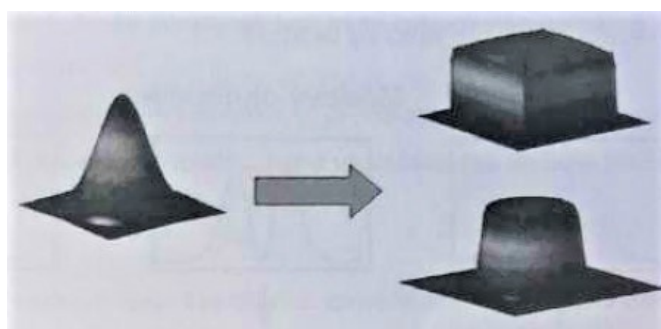
- **Koherentnost** – V prostorově koherentním prostředí kmitají všechny částice světelné vlny se stejnou fází v rovině kolmé na směr šíření paprsku. A v časově koherentním paprsku kmitají se stejnou fází všechny částice světelné vlny ve směru šíření paprsku. Děj má tedy velký stupeň prostorové a časové koherence. [6]
- **Modální struktura paprsku** – V optickém rezonátoru může existovat i elektromagnetické pole, které rozděluje amplitudu a fázi vlnění vznikající v rezonátoru. Toto částečné rozdělení pole ovlivňuje transverzální elektromagnetický mód pasivního rezonátoru (TEM). Příčný mód může být definovaný v kartézských souřadnicích (TEM_{mn}), nebo ve válcových (TEM_{pl}). Indexy m, n představují počet minima na průřezu paprsku ve vertikálním a horizontálním směru. Pro indexy p, l to platí analogicky na počet minima v radiálním a úhlovém rozložení. Čím vyšší je hodnota indexů, tím vyšší je řád (pořadí) módu. Mód má velký vliv na velikost stopy fokusovaného paprsku. Mód nejnižšího řádu je mód (TEM_{00}). Tento mód má Gaussovské rozložení, protože intenzita elektromagnetického pole měřená kolmo k optické ose má Gaussovský průběh. [10]



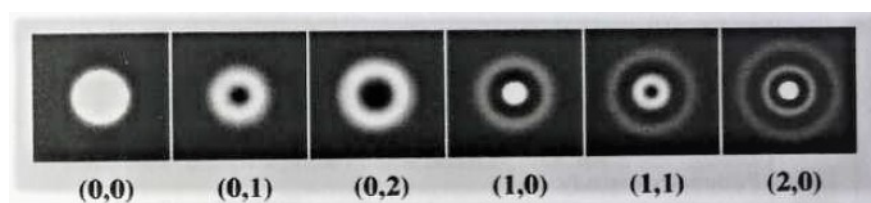
Obr. 9 Modální struktura laseru [11]

Úpravou parametrů v rezonátoru lze mód paprsku měnit. Na následujícím obrázku (Obr. 11) je několik módů, které lze získat modifikací základního módu vycházejícího z Gaussovy křivky. Svítivě bílá barva znázorňuje nejhustší, tedy energeticky nejvýkonnější část světelného svazku. Při řezání na CO₂ laseru se používají pouze dva módy. [11]

Moderní optické přístroje dokážou paprsek ve tvaru Gaussovy křivky upravit na tzv. „top hat profil“. Příčný průřez intenzity záření má tvar obdélníku. Mód je rotačně symetrický podle své osy, ale nemá vrchol intenzity. K jeho vzniku vedl požadavek, aby měl paprsek jasně definovanou ostrou hranici a bylo tak zřejmé, kde paprsek působí a kde je nezasažená oblast. Ve strojírenství se tento mód používá pro řezání silných plechů, protože top hat profil tvoří širší řeznou drážku. Používá se pro přesné povrchové kalení. [11]

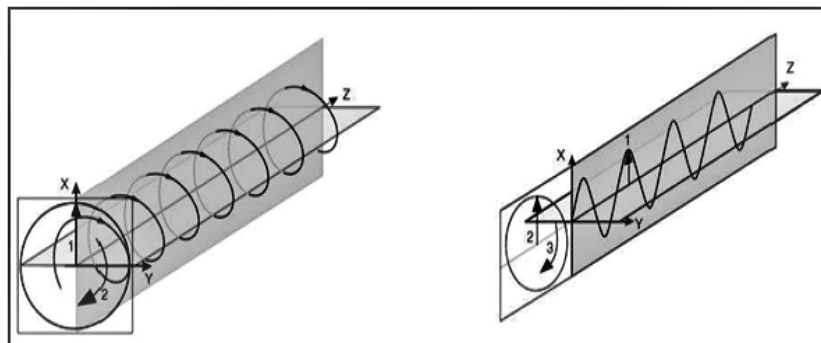


Obr. 10 Modální struktura laseru [11]



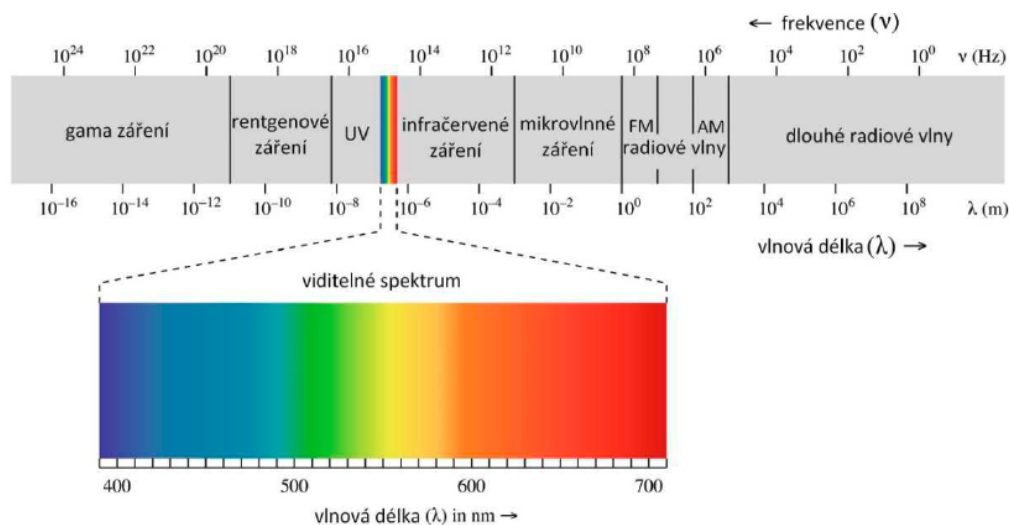
Obr. 11 Modální struktura laseru – módy vzniklé modifikací Gaussova svazku [11]

- **Polarizace paprsku** – Pokud je vlnění prostorově orientované na definované ploše je polarizované. Polarizace charakterizuje orientaci vektoru elektrického pole v elektromagnetické vlně, může tedy být kruhová (eliptická) – vlnění probíhá na šroubovité ploše, nebo lineární – vlnění probíhá na rovinné ploše. Polarizace dále ovlivňuje absorpci a reflexi. [4]



Obr. 12 Kruhová a lineární polarizace [4]

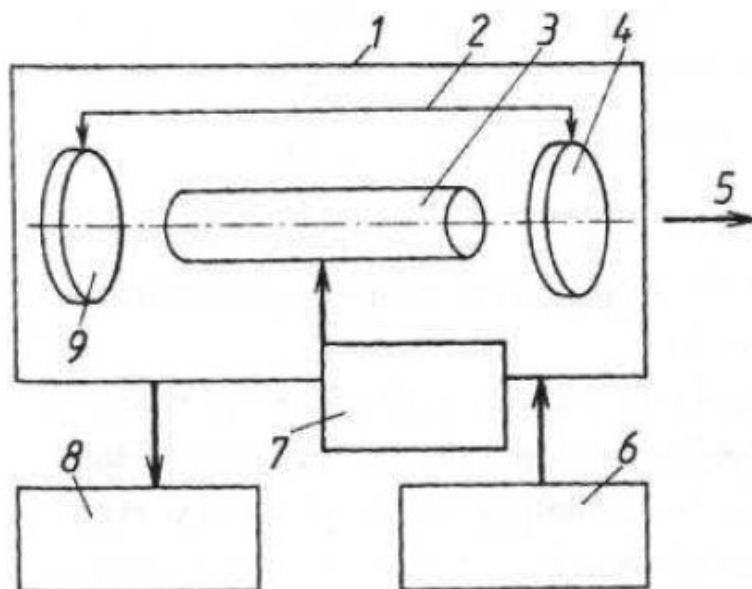
- **Vlnová délka** – Je základním parametrem laserového záření. Udává se v nanometrech ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Vlnová délka určuje, v jaké oblasti spektra se bude laserový paprsek pohybovat (viz obr. 13). Nejmenší vlnovou délku v oblasti viditelného spektra má fialový laser 395 až 410 nm. V praxi se používají lasery s vlnovou délkou 1 064 nm a u CO₂ laserů je vlnová délka až 10 000 nm, jejichž oblast viditelného spektra má červenou barvu. Vlnová délka je také důležitá i pro velikost stopy laseru. Podle vlnové délky lasery dělíme na termální, které jsou specifické vlnovou délkou vyšší než 630 nm, dále lasery pracující ve viditelném světle s vlnovou délkou 380 až 630 nm a v UV oblasti, ve které pracují lasery s vlnovou délkou méně než 380 nm. [4]



Obr. 13 Spektrum elektromagnetického záření [6]

2.4 Konstrukce laserového zařízení

Mezi základní části laseru patří laserová hlavice, jejíž součástí jsou: laserové médium, rezonátor, nepropustné zrcadlo, polopropustné zrcadlo, budící zařízení, zdroj energie buzení a chladicí systém. [8]



Obr. 14 Schéma zařízení pro obrábění laserem [8]

1. Laserová hlavice
2. Rezonátor
3. Laserové médium
4. Polopropustné zrcadlo
5. Výstup paprsku
6. Zdroj energie buzení
7. Budící zařízení
8. Chladicí systém
9. Nepropustné zrcadlo (zcela odrazové zrcadlo)

2.4.1 Rezonátor

Pro vznik laseru je další podmínkou zpětná vazba mezi vyzařovanými fotony, čímž dochází k zesílení výstupního zařízení. Tuto úlohu řeší rezonátor, který je společně s čistotou aktivního prostředí nejsložitější technologickou částí laseru. Rezonátor je v podstatě optická dutina, do níž je vložena aktivní látka, což umožňuje vícenásobnou stimulovanou emisi. Ve většině případů je rezonátor tvořen dvěma zrcadly zajišťující kladnou zpětnou vazbu záření

do aktivního prostředí, přičemž je jedno zrcadlo odrazové a druhé polopropustné, a zvenku je opatřen chladičem. Polopropustné zrcadlo přepustí část vzniklé světelné vlny ven z aktivního prostředí a druhá část vlny se vrací zpět, kde umožňuje další zesílení světla. Nejjednodušším a nejrozšířenějším rezonátorem je rovinný rezonátor s paralelními zrcadly. Konfokální, polo koncentrické či prstencové rezonátory jsou dalšími typy rezonátorů. Pokud v rezonátoru vzniká stojaté vlnění je zabezpečen jeho správný chod. Důležitá je také vzdálenost zrcadel, která závisí na vznikajícím záření podle vztahu: [4, 10]

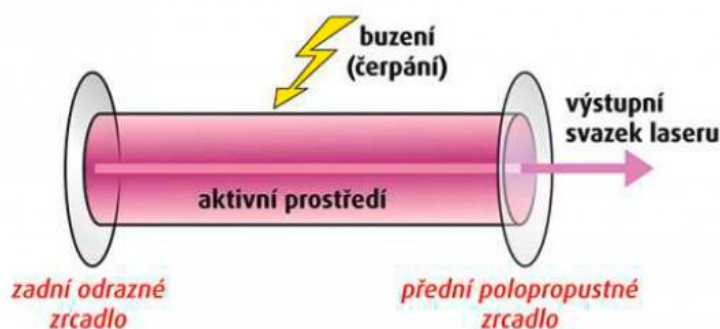
$$L = n \cdot \lambda$$

Kde:

L – vzdálenost mezi zrcadly [mm]

n – přirozené číslo [-]

λ – vlnová délka záření [nm]



Obr. 15 Schéma optického rezonátoru [6]

2.4.2 Laserové médium

Médium, které určuje vlnovou délku záření a vytváří tak aktivní prostředí. Je to sloučenina, ve které je možné elektrony nebo molekuly vhodným čerpáním budít na požadovanou pracovní hladinu. Laserové médium může být: [7, 8]

- Plynné – zde je aktivní prostředí jeden nebo více plynů (He: Ne, CO₂),
- Pevnolátkové – prostředí je tvořeno krystalem (rubín, Nd:YAG, Er:YAG),
- Diodové – představované polovodičem s přechodem typu p-n (GaAs, GaAsN),
- Kapalinové – aktivní prostředí obsahuje roztoky různých organických barviv (Rhodamin – barvivo).

2.4.3 Budící zdroj

Vhodným buzením aktivní látky je do prostředí dodávána excitační energie a docílíme jevu, který se nazývá inverze populace. Jedná se o nerovnovážný stav, kdy existuje více atomů na vyšších energetických hladinách než na nižších. Inverze populace je uvnitř aktivního prostředí důležitou podmínkou pro to, aby došlo k zesilování světla (stimulovaná emise). Způsob buzení závisí na použitém aktivním prostředí. Může být zajištěno optickým zářením (výbojka, laserová dioda), expanzí plynu, elektronovým svazkem, chemickou reakcí, elektrickým výbojem rekombinací atd. Dodaná energie je pak různými procesy přeměněna na energii ionizační. Zdroje buzení mohou pracovat jak kontinuálně, tak pulsně. [4]

2.4.4 Chladicí zařízení

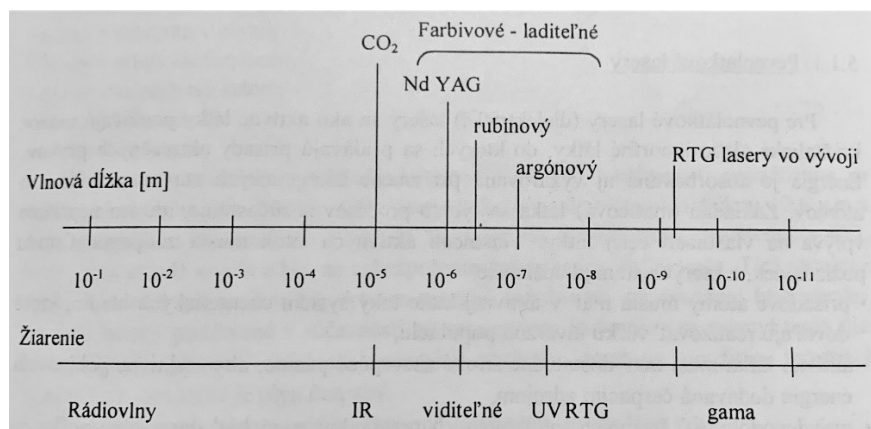
Slouží k odvodu nevyužité energie, ze které nevznikne záření, ale tepelná energie. Toto zařízení se ovšem používá i k ochraně probíhajícího procesu nejen k chlazení. Jako chladicí médium se u laserů využívá voda. Chladicí okruh je rozdělen do dvou větví. Ve vnější větvi je použita voda z vodovodu, nebo ze speciálního zásobníku oproti vnitřní větvi, kde okruhem proudí deionizovaná voda. V dnešní době výrobci laserových zařízení konstruují také speciální chladicí zařízení, kde je vnitřní okruh chlazen vzduchem. [7, 8]

2.5 Rozdělení a klasifikace laserů

Základní rozdělení laserů je podle aktivního prostředí, které se používá na generování záření. Jako laserové aktivní prostředí je možné použít rozličné materiály v různých skupenstvích. Vlastnosti materiálů aktivního prostředí se proto od sebe velmi výrazně liší, navíc matrice materiálů aktivního prostředí určuje technické vlastnosti laseru. Lasery lze obecně rozdělit dle několika kritérií: [6]

- **Aktivní prostředí**
 - pevnolátkové, plynové, kapalinové, plazmatické, polovodičové
- **Způsob čerpání energie**
 - elektrický výboj, optický, elektronovým svazkem, chemický, termodynamický, injekcí nosičů náboje, rekombinací
- **Energetický výkon**
 - nízkovýkonové – desetiny až stovky W, vysokovýkonové – 1 až 30 kW
- **Podle režimu práce**

- spojitý (kontinuální) režim, pulsní, impulsní
- **Oblasti použití**
 - technologické, lékařské, energetické, měřicí, výzkumné, vojenské
- **Vlnová délka**
 - ultrafialové, viditelného pásma, infračervené, gama záření, rentgenové



Obr. 16 Rozdělení laserů podle vlnové délky záření [10]

2.5.1 Pevnolátkové lasery

Je to skupina laserů, jejichž aktivním prostředím je pevná opticky propustná látka – krystaly, oxidy, alumináty, granáty, fluoridy, oxysulfidy, fosfáty, silikáty, molybdáty, tungstáty, vanadáty, beryláty, sklo a keramika. Základním materiálem aktivního prostředí je matrice, která musí být průhledná, opticky homogenní a je možné ji vyrábět uměle. Tyčka, která tvoří aktivní prostředí, je dokonale vyleštěná a její konce jsou kolmé na osu, nebo svírají s podélnou osou krystalu určitý úhel – Brewsterův. Oba konce tyčky mohou být opatřeny tenkou vrstvou kovu (např. stříbra), která vytváří na jedné straně dokonale odrazovou a na druhé polopropustnou plochu. Tyčka je pak umístěna do odrazové komory s kruhovým, nebo lépe eliptickým, průřezem. Pro buzení se nejvíce používají výbojky nebo laserové diody. Výbojka, nejčastěji v podobě výbojkové trubice, je umístěna v dutině s vysoce odrazovými stěnami. Účinnost těchto laserů je však velmi malá, což je dáno hlavně kvalitou odrazové dutiny a značným zahříváním krystalu. Mezi pevnolátkové lasery patří:

- Rubínový laser
- Vláknový laser (Al_2O_3 aktivace ionty Cr^{3+})
- Nd:YAG laser (ytrium-aluminium-granátu, dopovaný neodymem)

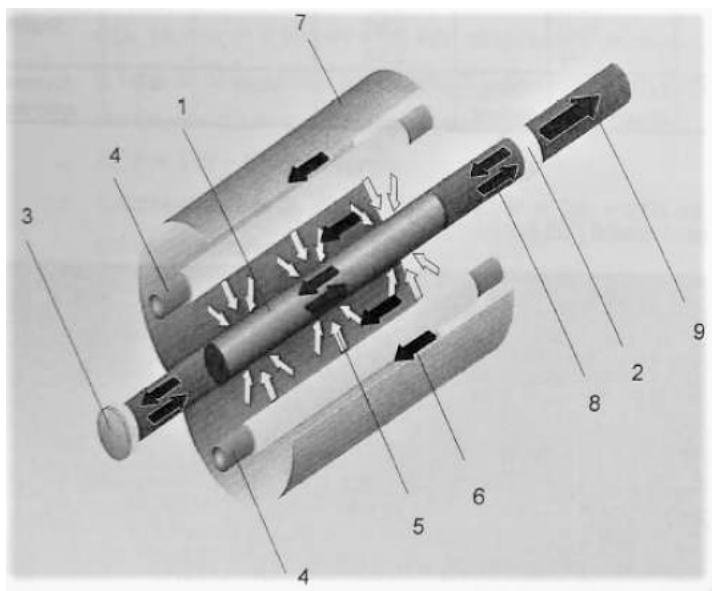
- Er:YAG laser (yttrium-aluminium-granátu, dopovaný erbiem)
- Nd:YLF laser (lithium-yttrium, fluoridu, dopovaný neodymem)
- Ho/CTH: YAG laser

Nd:YAG laser

Je nejrozšířenější pevnofázový technologický laser pracující na bázi krystalu Nd:YAG. Tento typ zařízení je schopný impulzního i kontinuálního provozu. Světlo emitující s délkou vlny $1,06\text{ }\mu\text{m}$ a má elektrickou účinnost pod 5 % při nabuzení plynovým výbojovými lampami. Aktivní laserové médium Neodymium je umístěno v pevném krystalu zhotoveném z Yt-Al granátu, který má tvar tyčky. Typická vlnová délka záření za pokojové teploty v pulsním i kontinuálním režimu (cw) je 1064 nm. S menší účinností však může emitovat i záření s vlnovou délkou 940, 1120, 1320, 1440 nm. Metodami nelineární optiky je možno dosáhnout generace záření na vlnové délce 532 nm, případně 355 nebo 266 nm. Nd:YAG laser dosahuje na vlnové délce 1064 nm v (cw) režimu maximálního výkonu od stovek do tisíců wattů, v pulsním režimu pak bývá energie pulsů do desítek joulů. Délka pulsů je od zlomku sekundy do 5 piko sekund, přičemž záleží na druhu použité modulace kvality rezonátoru.

Konstrukce pevnolátkových laserů je například ve srovnání s plynovými lasery podstatně kompaktnější a jednodušší. Oproti CO₂ laseru mají kratší a příznivější vlnovou délku a při údržbě dochází jen k výměně čerpacích výbojek. Výbojky jsou uzavřeny v dutině rezonátoru, která se volí vždy tak, aby většina světla byla odražena zpět do krystalu. Dutina bývá ke zvýšení odrazivosti světla pokovená. Velkou výhodou Nd:YAG laseru je možnost přenosu optických vláken na vzdálenost několik desítek metrů. Nevýhodou je naopak poměrně nízká účinnost. Velký elektrický příkon výkonových systémů způsobuje, že je většina energie přeměňována v teplo, z čehož plynou značné nároky na chlazení systému.

[10]



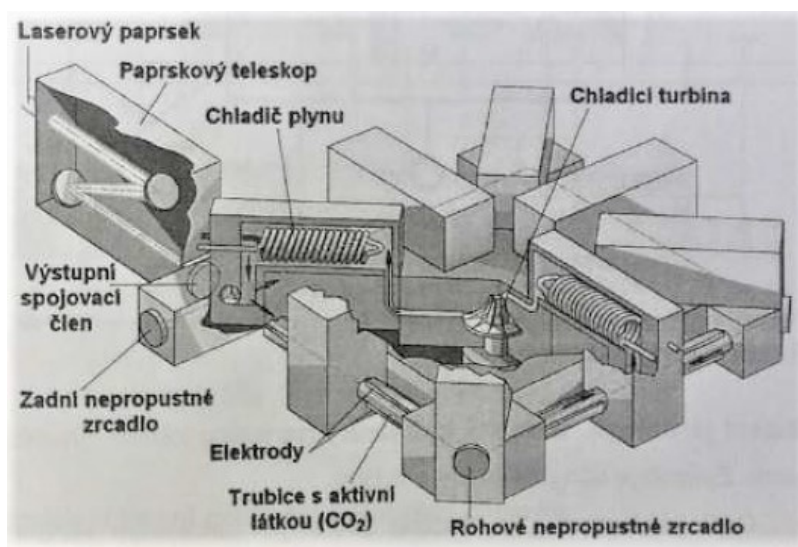
Obr. 17 Schéma Nd:YAG laseru [11]

1. Aktivní médium (Nd:YAG krystal)
2. Výstupní zrcadlo
3. Zpětné zrcadlo
4. Buzení (výbojky)
5. Budící světlo (budící energie)
6. Chladicí voda
7. Odrazové zrcadlo – reflektor
8. Stimulovaná emise
9. Paprsek laseru

2.5.2 Plynové lasery

Aktivní prostředí plynových laserů je tvořeno atomy, ionty nebo molekulami v plynné fázi. Tyto lasery pracují v pulzním (maximálně stovky W) nebo kontinuálním režimu (od mW až po desítky kW). Vlnové délky záření pokrývají širokou oblast spektra od ultrafialové oblasti přes viditelnou, infračervenou, podmilimetrovou a milimetrovou oblast. Tato skupina laserů se skládá z helium-neonového laseru, jódového laseru, měďného laseru, argonového laseru, helium-kamidového laseru, dusíkového laseru, vodíkového laseru a CO₂ laseru. Pro excitaci těchto laserů se většinou používá elektrický výboj ve zředěném plynu, oproti tomu je méně často využívána optická excitace. Vysokým přínosem plynových laserů je jejich vysoká účinnost (u CO₂ až 40 %) a k tomu i vysoká kvalita paprsku. Naopak nevýhodou je malý výkon, který lze získat z jednotky objemu aktivního prostředí. Důležitým faktorem

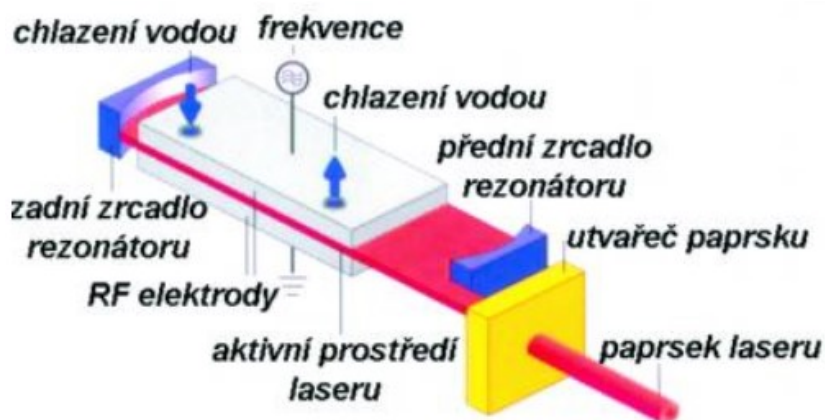
plynových laserů je chlazení, jelikož laserový plyn dosahuje v provozu vysokých teplot (200–300 °C). [10, 6]



Obr. 18 Schéma plynového laseru [11]

CO₂ lasery

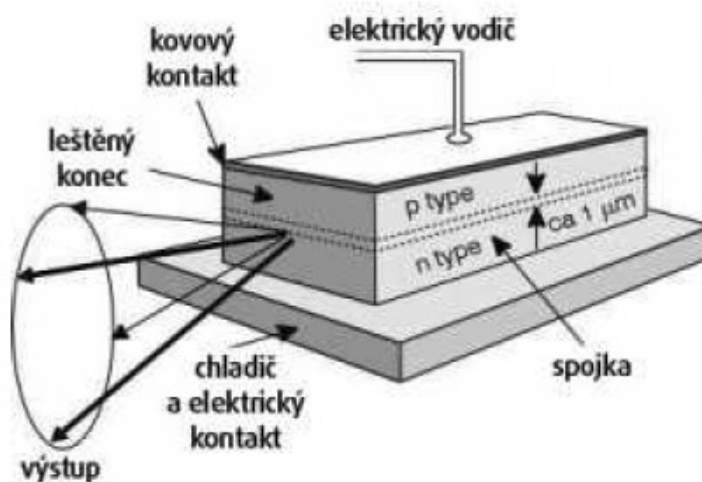
Jsou to jedny z nejstarších a stále nepoužívanějších plynových laserů. Jejich aktivní prostředí je tvořeno molekulami oxidu uhličitého a je buzeno elektrickým výbojem. Mají účinnost cca 10 až 15 % a velký kontinuální výkon až do desítek kW. Nevýhodou těchto laserů je vlnová délka (10,6 μm) a potřeba dopravit laserový paprsek do místa záření pomocí systémů zrcadel. Tato zařízení jsou závislá na přívodu chladicí kapaliny, dodávce pracovní plyné směsi a potřebují rovněž nepřetržitou kontrolu a údržbu. V průmyslu se lasery s výkonem do 1,5 kW používají pro značení, gravírování a řezání nekovů (plasty, papír, skla, kůže apod.). [10, 11, 6]



Obr. 19 Konstrukce CO₂ laseru [8]

2.5.3 Polovodičové lasery

Polovodičové lasery jsou v dnešní době vůbec nejrozšířenějšími lasery. Aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními částicemi nerovnovážné elektrony a díry, tj. volné nosiče náboje, které mohou být injektovány. Aktivní prostředí polovodičových laserů se budí převodem elektronů z valenčního do vodivostního pásu. Vlastnosti těchto pásů se upravují dopováním polovodičů vhodnými příměsmi. Pro zdroj buzení se nejčastěji využívá injektování proudu přes přechod PN polovodiče. Jako výhodu lze považovat jejich vysokou účinnost (až 50 %), kompaktnost, možnost spektrálního přeladění v širokém spektrálním pásmu a na základě výběru aktivního prostředí generace záření různých vlnových délek. Nejčastěji se využívají pro popisování součástí, řezání, svařování a nanášení povlaků. [11, 6]



Obr. 20 Konstrukce polovodičového laseru [6]

2.5.4 Kapalinové lasery

U kapalinových laserů tvoří častěji aktivní prostředí roztoky organických barviv (Rhodamin 6G, Rhodamin B, Fluorescein, Alizarin aj.). Díky několika druhům barviv a metod je možné dosáhnout všech vlnových délek od 0,3 μm do 1,5 μm . Organická barviva jsou komplexy organických sloučenin, které mají široké fluorescenční spektrum umožňující spojitě měnit vlnovou délku záření generovaného těmito lasery. Pro buzení kapalinových laserů se užívá optické záření. Jednou z hlavních výhod kapalných laserů je vysoká optická homogenita při velké koncentraci aktivační příměsi, což umožní získat velkou hustotu indukovaného záření a snížit vnitřní ztráty v aktivní látce. Oproti tomu je u kapalinových laserů krátká životnost aktivního prostředí a její následný rozklad způsobený teplem a světlem, což je jejich nevýhoda. Použití je především ve spektroskopii. [6, 8, 11]

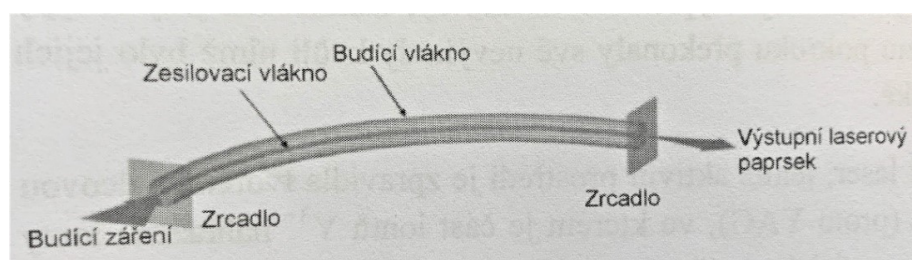
2.5.5 Nové druhy laserů

Do vývoje laserových technologií je vkládáno velké množství práce, úsilí a financí, tudíž není divu, že jejich vývoj není zdaleka u konce. Proto se u speciálních aplikací používají i jiné laserové systémy. K těmto rozvojem laserové techniky dochází už od 90. let minulého století a za tuto dobu vznikla celá řada nových technologických variant, a to: [4]

- Diskové lasery s aktivním médiem ve tvaru tenkého kotouče
- Pevnolátkové lasery s deskovou formou krystalu
- CO₂ lasery s deskovou nebo koaxiální formou elektrod
- Polovodičové lasery
- Výkonové vláknové lasery

Vláknové lasery

Jednou z cest, jak potlačit nevýhody základní konfigurace pevnolátkového laseru, je vytvořit z aktivního prostředí optické vlákno. Tyto křemenná vlákna dopovaná prvky vzácných zemin (Yterbium, Erbium, Neodym) tvoří aktivní prostředí vláknových laserů. Jejich optické vlákno v podstatě odpovídá svou funkcí úloze krystalu používaného u pevnolátkových laserů. Vláknové lasery vyzařují záření o vlnových délkách od 1000 do 1500 nm a pracují v kontinuálním režimu. Jejich výhodou je vysoká životnost i účinnost, dobrá kvalita laserového paprsku a nízká pořizovací cena. [4, 13]

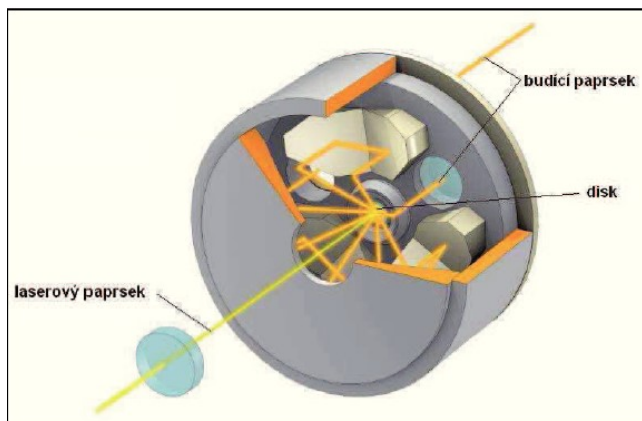


Obr. 21 Princip vláknového laseru [13]

Kotoučové lasery

Dalším vývojovým stádiem diodami čerpaných pevnolátkových laserů jsou kotoučové lasery. U tohoto typu laserů je krystal používaný dosud ve tvaru válce nebo desky nahrazen kotoučem o tloušťce desetin mm a průměru až 100 mm. U kotoučových laserů lze kotouč vyrobit z krystalu Yb:YAG, čímž se oproti krystalu z Nd:YAG zvýší účinnost čerpání ze 76 % na 91 %. Pro čerpání aktivního média je u kotoučových laserů podstatný vícenásobný přechod záření od laserové diody přes reflektující vrstvy jedné strany kotouče

a okolních reflektorů. Pracují v kontinuálním i pulsním režimu s účinností až 91 %. Rychlý vývoj těchto laserů přináší od původních wattových typů dnes už kilowattové. [4]



Obr. 22 Princip kotoučového laseru [4]

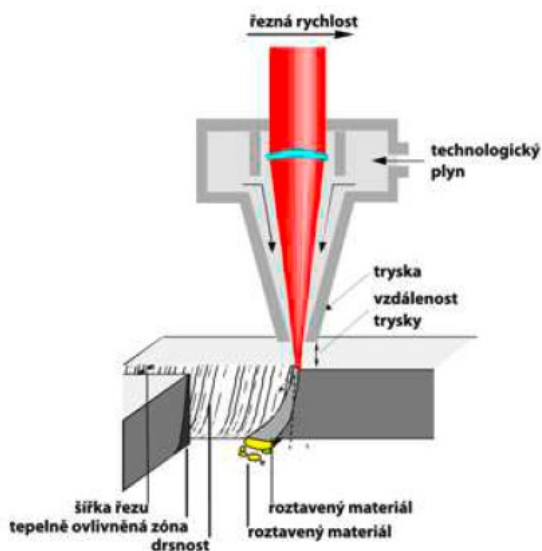
3. Aplikace laseru

Laserové technologie jsou významně zastoupeny v mnoha aplikacích od průmyslu až po kosmonautiku. Ve strojírenských aplikacích se užívá při technologiích svařování, řezání, vrtání, tepelném zpracování, značení a gravírování, povlakování, nebo tvorbě speciálních povrchových úprav. Základní předností laserových technologických operací je možnost opracování bez mechanického kontaktu s výrobkem, dále schopnost opracování obtížně přístupných částí materiálu a technologické zpracování těžkoobrobitelných materiálů. Ve výrobním procesu se řadí k nejprogresivnějším způsobům působení člověka na materiál. V porovnání s konvenčními technologiemi laser převyšuje v důležitých aspektech produkce, a to zejména v přesnosti, výkonnosti a flexibilitě. [4, 8]

3.1 Laserové řezání

Nejrozšířenější technologií zpracování laserem je řezání. Podstata laserového řezání je fokusace vysoké energie laserového záření na malý bod obrobku, kdy dochází k lokálnímu tavení nebo chemické degradaci do hloubky materiálu. Řezání materiálů je umožněno odstraněním par kovů a taveniny z místa řezu pomocí pracovního plynu. Plyn proudí pod vysokým tlakem výstupní řezací tryskou kolem svazku fotonů. Řezná rychlost roste lineárně s výkonem laseru a klesá s tloušťkou materiálu. Vysoká koncentrace energie umožňuje dělit všechny technické materiály bez ohledu na jejich tepelné, fyzikální a chemické vlastnosti. Podle pracovního plynu se řezání rozděluje na několik metod: [13]

- Sublimační řezání
- Tavné řezání
- Oxidační řezání

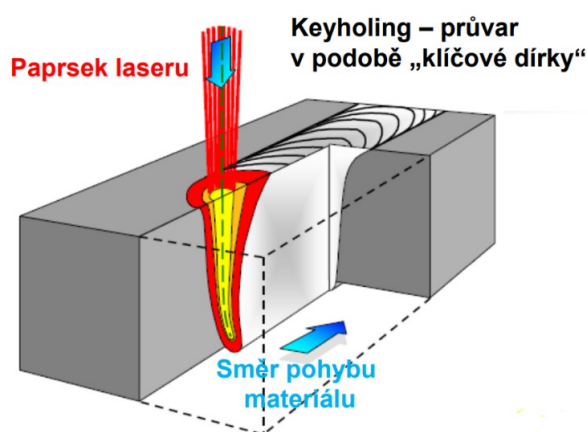


Obr. 23 Princip řezání laserem [6]

Proces řezání laserem je podrobněji popsán v kapitole 4.

3.2 Laserové svařování

Pomocí laserového svařování je možné svařovat materiály s vysokou teplotou tavení (W, Ta, Mo, Ti, Zr), ale také s vysokou tepelnou vodivostí (Cu, Ag, Al). Při této technologii se využívá vysoké hustoty záření v ohnisku. Při vhodném zkombinování svařovacích parametrů (výkon laseru, svařovací rychlost) dochází k efektu tzv. „klíčové dírky“ (key hole). Bodově nahlřátý materiál se okamžitě odpaří a vzniká dutina naplněná parami odpařeného materiálu, jejíž stěny jsou tvořeny roztaveným materiálem. Za touto dutinou pak vzniká oblast svaru. Laserem lze vytvářet hluboký závar při vysoké svařovací rychlosti a nízkém tepelném zatížení (menší deformace). Proces laserového svařování vyžaduje ve srovnání s jinými metodami menší intenzitu záření optického svazku a větší délku laserového impulsu. Výkon laseru se pro svařování pohybuje od 0,5 do 0,9 kW. [6, 13]



Obr. 24 Svařování laserem – Key hole [13]

3.3 Tepelné zpracování laserem

Při těchto metodách velikosti výkonů nedosahují hodnot nutných pro řezání nebo svařování, ale vhodným tvarováním paprsku je nastavena ozářená plocha tak, aby v daném místě došlo k lokálnímu ohřevu nad transformační teplotu s následným ochlazením a vytvořením potřebné struktury. Hustota dopadajícího svazku laserového záření a doba jeho působení nám určuje míru tepelného ovlivnění materiálu. Tato metoda má oproti jiným možnost tepelného zpracování i na velmi těžko přístupných místech materiálu. [13]

- Kalení laserem
- Žíhání laserem
- Popouštění laserem
- Tepelné zpevnění s natavením a amortizace povrchu
- Odpařování materiálu – rázové zpevnění

3.4 Laserové gravírování a popisování

Princip gravírování laserem spočívá v lokálním odpaření povrchové vrstvy materiálu (běžně do 0,1 mm) a tím vytvoření viditelné stopy. Od popisování se liší pouze úpravou parametrů, kde od povrchového popisu v několika mikronové hloubce materiálu přechází gravírování do větších hloubek (až 1 mm). Pokud je povrch gravírovaného materiálu opatřen např. barevnou vrstvou, tak se při odpaření zvýší kontrast gravírovaného obrazce. Lze gravírovat téměř jakýkoliv materiál (ocel, měď, hliník, keramika, sklo, dřevo, guma, plast, papír). Zařízení určená speciálně jen pro gravírování mají výkon řádově jen desítky wattů. [4, 6, 13]



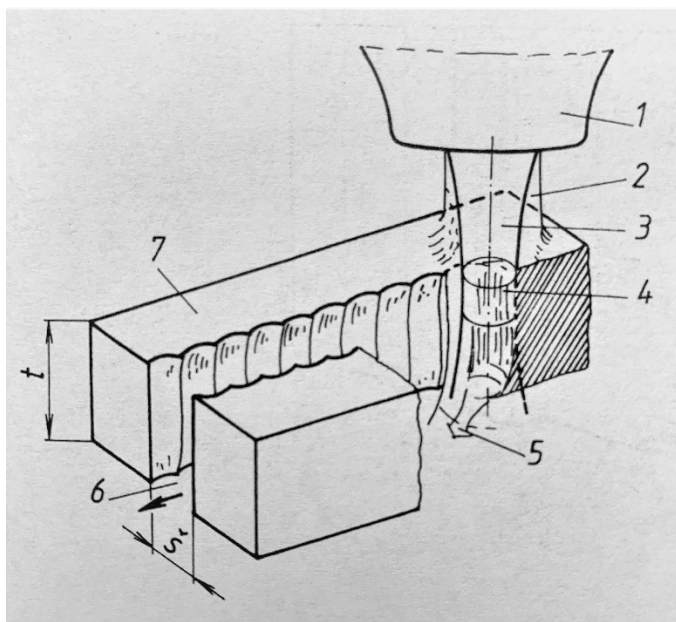
Obr. 25 Gravírování laserem [14]

3.5 Vrtání laserem

Tato technologie spočívá v postupně a rychle se odstraňujícím materiálu z řezu, aniž by se zahřál nad odpařovací teplotu. Avšak část materiálu, která se nachází uprostřed paprsku, je odpařena. Materiál je tedy ze vznikajícího otvoru odstraňován v kapalném stavu a jen malá část materiálu vypařením ze středu paprsku. Tato technologie je aplikována především při vytváření malých otvorů (kruhových i tvarových) o průměru od 10 do 100 μm i v těžko dostupných místech. Délky děr mohou dosahovat délky až 50 mm. [11]

4. Proces řezání laserem

Tento proces probíhá na základě vzájemného působení laserového svazku, řezaného materiálu a řezného plynu. Laserové záření, které produkuje vysokou koncentraci energie, umožňuje dělit všechny technické materiály bez ohledu na jejich fyzikální, tepelné a chemické vlastnosti vysokou rychlostí, čímž zabezpečuje vysokou produktivitu práce. Laserový svazek, který vychází z rezonátoru, má velmi malý úhel otevření, jehož rozdělení hustoty energie odpovídá Gaussově křivce. Dále je paprsek přiváděn do místa řezu soustavou zrcadel, v pracovní hlavě je zaostřován čočkou na povrch materiálu a tím způsobuje natavení. Pokud laserový svazek ozáří povrch materiálu, tak je částečně odražen a z části se absorbuje do materiálu. [4, 6, 13]

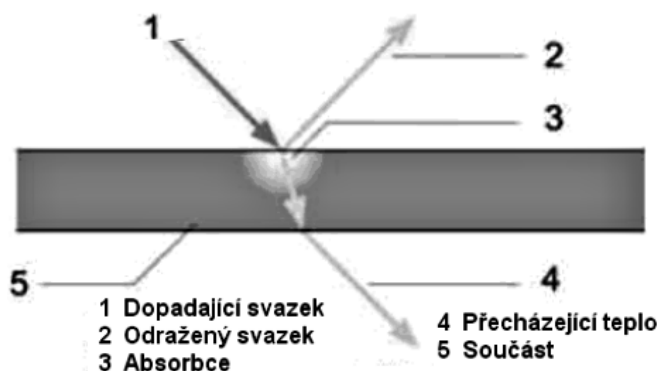


Obr. 26 Schéma procesu řezání materiálů laserem [15]

1. Řezací tryska
2. Asistenční plyn
3. Paprsek laseru
4. Poloha ohniska zaostření paprsku laseru
5. Odtavený materiál
6. Řezná spára
7. Obrobek

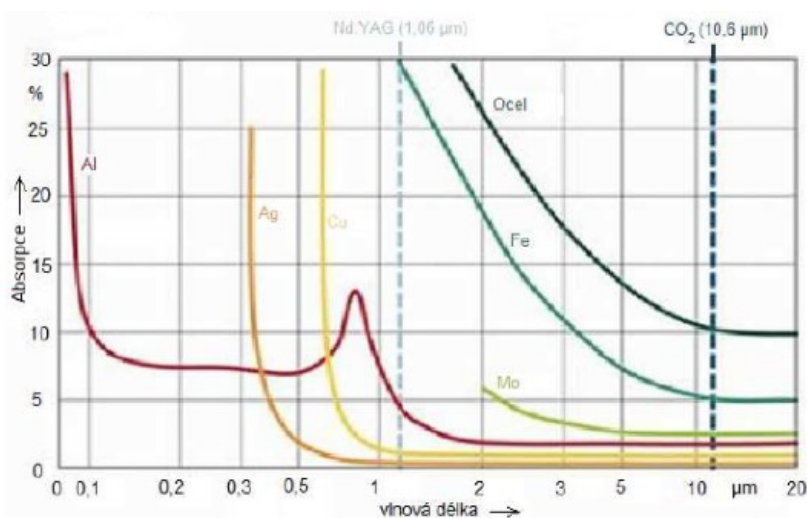
Interakce laserového paprsku s materiálem

Jedním ze základních předpokladů při obrábění laserem a jeho využití energie laserového svazku je schopnost materiálu pohlcovat laserové záření a měnit tak energii svazku na teplo. Schopnost absorbovat laserové záření je tedy velmi důležitým faktorem při laserovém řezání. Obecně lze energii dopadajícího záření rozdělit na absorbovanou, procházející a odraženou. Absorpci materiálu nejvíce ovlivňuje vlnová délka dopadajícího záření, druh materiálu, způsob polarizace, teplota a stav povrchu. [15, 16]



Obr. 27 Interakce laserového záření [15]

Po dopadu paprsku na materiál se část paprsků odrazí, část se absorbuje do materiálu a část projde materiálem. Absorbované paprsky zahřívají materiál, který se ohřevem nataví a následně odpaří z ohřáté oblasti. Množství odražených paprsků závisí na odrazivosti materiálu. Odrazivost infračerveného světla od kovových povrchů je velmi vysoká, ale snížit se dá například zdrsněním povrchu, porušením oxidické vrstvy, nebo ohřátím materiálu na teplotu blízkou teploty tavení. Absorpce světelného záření a následný ohřev kovového povrchů, ale i jiných materiálů závisí na tepelné vodivosti materiálů. [15, 16]



Obr. 28 Závislost absorpce na vlnové délce záření pro různé materiály [16]

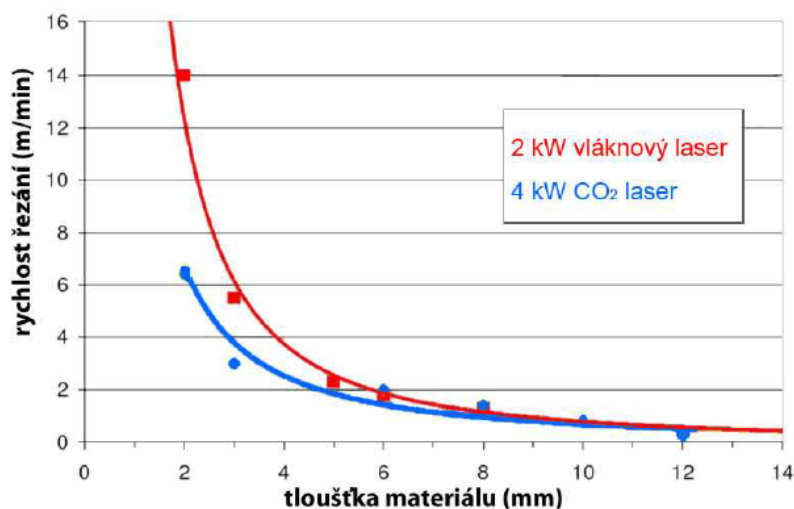
4.1 Parametry laserového řezání

4.1.1 Výkon laseru

Výkon laseru závisí především na druhu a tloušťce řezaného materiálu. Výkon laseru, druh materiálu případně i druh laseru ve výsledku určují možnou maximální tloušťku řezaného materiálu. Obecně lze tedy konstatovat, že se zvyšujícím výkonem laseru roste i maximální možná tloušťka řezání. Pokud bude nastaven špatný výkon laseru, může v závěru způsobit výrazné zhoršení kvality řezané plochy. [16]

4.1.2 Řezná rychlost

Obdobně jako výkon laseru je i řezná rychlost přizpůsobena druhu a tloušťce materiálu. Pro řez splňující předepsané normy musí být s ohledem na ostatní parametry nastavena správná řezná rychlost. Při použití vyšších řezných rychlostí se může stát, že nedojde ani k oddělení materiálu, a naopak při nižších řezných rychlostech může dojít k zhrubnutí řezu následkem vypalování materiálu. Zásadou je, že s rostoucí tloušťkou materiálu je potřeba snižovat řeznou rychlost. [16]



Obr. 29 Srovnání řezných rychlostí v závislosti na tloušťce materiálu při řezání korozivzdorné oceli [16]

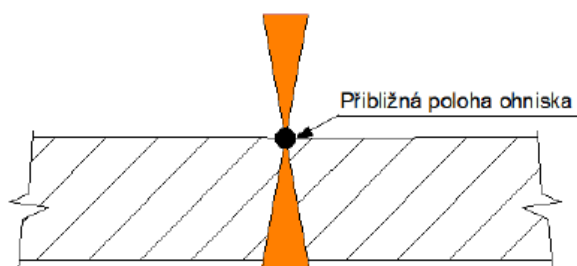
4.1.3 Geometrie tvaru trysky a tlak plynu

Tyto faktory podstatně ovlivňují kvalitu řezu, drsnost povrchu řezné plochy a tvorbu otřepů. Spotřeba řezného plynu je dána nastavením tlaku a průměrem řezací trysky. Mezera mezi tryskou a materiálem musí být pokud možno co nejmenší (obvykle bývá od 0,5 do 1,5 mm), aby plyn optimálně pracoval v řezné spáře. Konvenční tryska má většinou kruhový

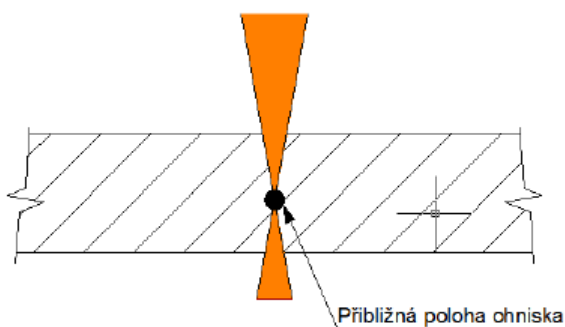
otvor (od 0,8 do 2,7 mm) s kónickým průběhem. Pro docílení kvalitního řezu musí být vystředěn paprsek vůči středu otvoru řezací trysky. [4, 16]

4.1.4 Poloha ohniska

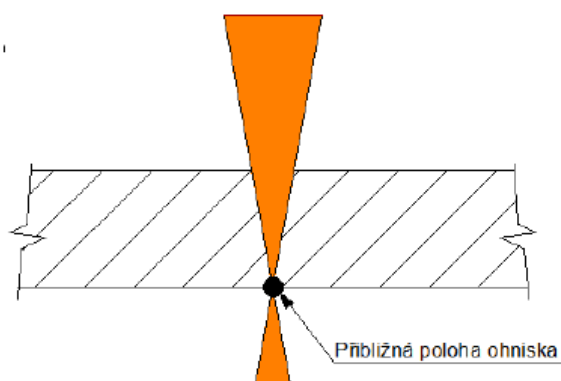
Poloha ohniska z velké části ovlivňuje výslednou kvalitu řezu. Tento parametr je volen podle řezaného materiálu a druhu řezání. Ovlivňuje také množství vneseného tepla do místa řezu a šířku řezné spáry. Při sublimačním řezání se ohnisko nastavuje na povrch materiálu. U oxidačního řezání je poloha ohniska cca ve dvou třetinách tloušťky materiálu oproti tavnému řezání, kde je ohnisko na spodní straně řezaného materiálu. [6]



Obr. 30 Poloha ohniska při sublimačním řezání [17]



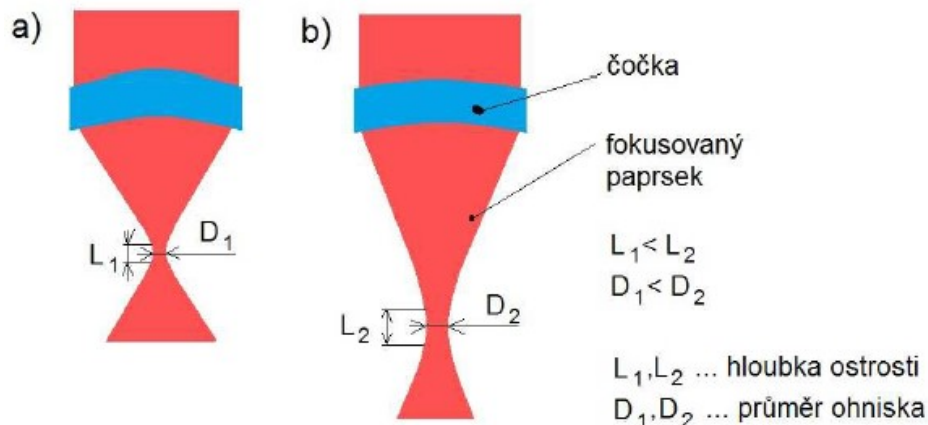
Obr. 31 Poloha ohniska při oxidačním řezání [17]



Obr. 32 Poloha ohniska při tavném řezání [17]

4.1.5 Vzdálenost ohniska

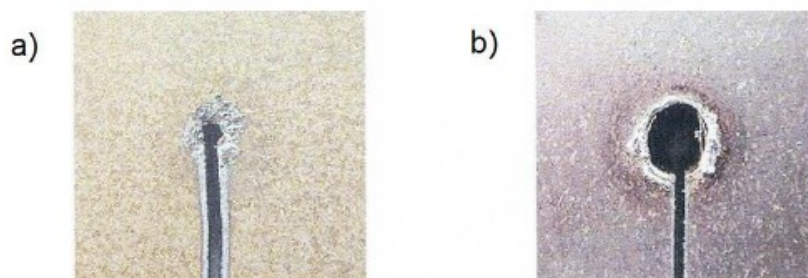
Tento parametr je dán druhem řezné hlavy, tedy v podstatě použitou fokusační čočkou, nebo optikou. V zásadě platí, že se zvětšující se ohniskovou vzdáleností také roste průměr ohniska a Rayleighova délka (je to délka shodná s hloubkou ostrosti). [16]



Obr. 33 Vliv ohniskové vzdálenosti na hloubku ostrosti a průměr ohniska a) použití čočky s menší ohniskovou vzdáleností b) použití čočky s větší ohniskovou vzdáleností [16]

4.1.6 Režim řezání a zapichování

Režim, ve kterém může probíhat zapichování nebo řezání je buďto kontinuální nebo pulzní. Pulzní řezání vytváří možnost výroby obtížnějších tvarů, speciálně ostré špičky bez rádiusů, a zároveň se do materiálu vnáší méně tepla. Při pulzním řezání je výrazně zpomalena řezná rychlost a k tomu dochází k výraznému zhrubnutí řezu a vzniku oxidů na povrchu materiálu, což jsou podstatné nevýhody tohoto režimu. Při použití pulzního režimu zapichování můžeme vytvořit malý a jemný startovací otvor. Využívá se při řezání malých otvorů v součásti, nebo jestliže potřebujeme vytvoření startovacího otvoru přímo na kontuře součásti. Režim kontinuální využívá v porovnání s pulzním režimem vyšší rychlosti, ale problém nastává při zápichu, kdy se vytvoří větší kráter a kov je kvůli tomu více rozstříknut po součásti, přitom je do materiálu vneseno více tepla. [16]



Obr. 34 Startovací otvor a) pulzní zápich b) kontinuální zápich [16]

4.2 Technologické plyny pro řezání laserem

Technologické plyny se výrazně podílí na vlastním technologickém zpracování materiálu. Druh, čistota i množství plynu závisí na druhu použitého materiálu a na použité technologii. Při laserovém řezání se přivádí proud daného plynu (dusík, kyslík) koaxiálně s laserovým svazkem. Plyn proudí do místa řezu pod vysokým tlakem řezací tryskou a tím umožňuje odstranění vzniklé taveniny, oxidů a výparů z dutiny řezu. [4]

4.2.1 Kyslík

Tento plyn je jeden z nejvyužívanějších řezných plynů při řezání nízkolegovaných a nelegovaných ocelí. Kyslík chemicky reaguje s řezaným materiálem (exotermická reakce) a tím zajišťuje ve srovnání s dusíkem vyšší řezné rychlosti. Pro dosažení velké kvality řezání a produktivity je vhodné použít vysoké čistoty kyslíku (min. 99,95 %). [4]

4.2.2 Dusík

Používá se především k řezání korozivzdorných a vysoce legovaných ocelí, mědi, hliníku a jeho slitin. Dusík nereaguje s řezaným materiálem, tudíž chybí tepelný účinek chemické reakce, a řezná rychlost je tedy oproti použití kyslíku nižší. Během řezání nedochází k oxidaci materiálu, což se projevuje u zachování korozivzdornosti u korozivzdorných materiálů. K dosažení kvalitní řezné hrany a minimálního chemického ovlivnění materiálu je žádoucí použít dusík vysoké čistoty (min. 99,999 %). [4]

4.2.3 Argon

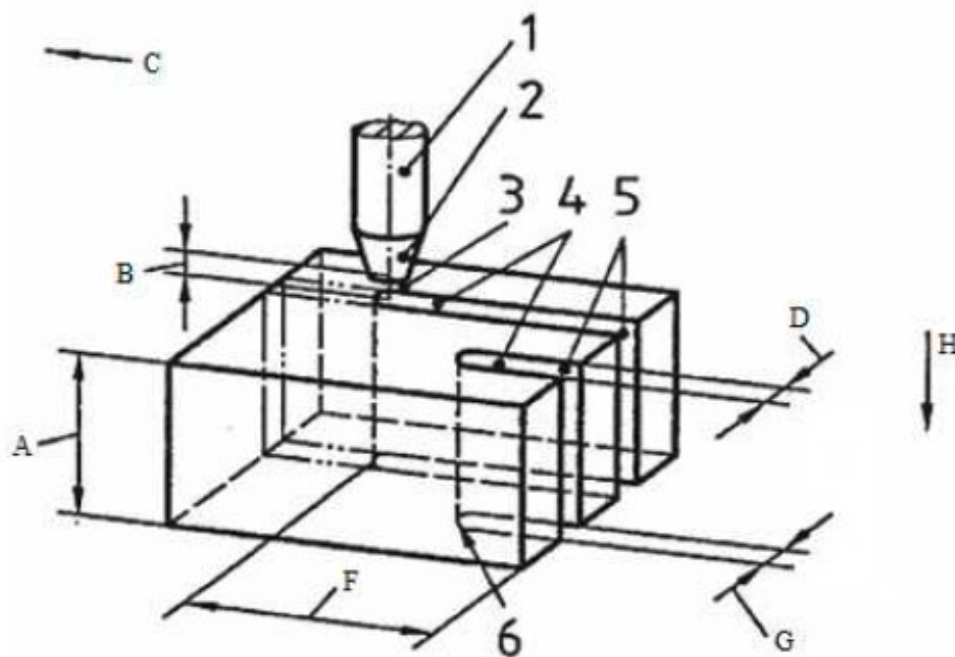
Argon se používá pro řezání vysoce reaktivních kovů jako titan a zirkonium, kdy musíme využít zcela inertního plynu, který nebude chemicky reagovat s řezaným kovem a současně bude chránit řezné plochy před účinky okolního vzduchu. [4]

4.2.4 Stlačený vzduch

Stlačený atmosférický vzduch lze u moderních řezacích zařízení využívat při řezání jak nízkolegovaných, nelegovaných, tak korozivzdorných ocelí. Řezné rychlosti se dají srovnat s rychlostmi řezání pomocí dusíku. Maximální tloušťky se odvíjí od výkonu laseru (např. výkon laseru 4000 W může řezat nelegované oceli do tloušťky 5 mm). Řezná hrana má vysokou kvalitu a vzhledem k využití plynu, který se nemusí technicky upravovat, je ekonomicky velmi výhodný.

4.3 Kvalita povrchu

Pro hodnocení kvality řezu se posuzuje vzhled řezné plochy výpalku. Posuzování stavu povrchů a řezných ploch se provádí podle normy ČSN EN ISO 9013. Jedná se o mezinárodní normu, která se používá pro materiály vhodné pro řезы laserem od 0,5 do 40 mm a zahrnuje jakosti povrchu řezu (dosahující drsnosti R_a 3,6 až 12 μm), či geometrické požadavky obrobku. [4]

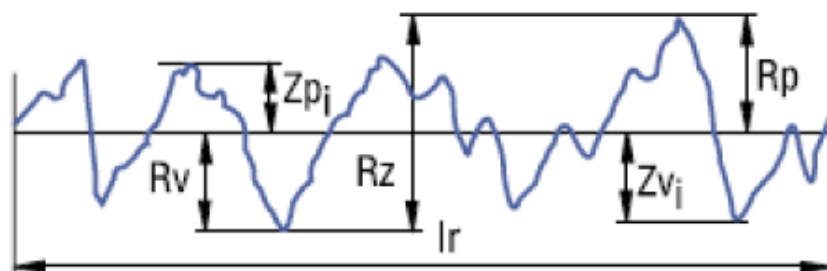


Obr. 35 Termíny k procesu řezání – 1) řezací hořák 2) hořák 3) svazek 4) řezná spára 5) počátek řezu 6) konec řezu
A) tloušťka obráběného materiálu B) vzdálenost trysky C) směr posunu D) šířka řezné spáry F) délka řezu G) šířka řezné spáry na spodní ploše H) směr řezání [6]

Charakteristickými veličinami určujícími kvalitu povrchu řezu tepelně dělených materiálů podle ČSN EN ISO 9013 jsou zejména drsnost povrchu, úchylka kolmosti, úchylka úhlu „u“, skluz „n“ a natavení horní hrany, r.

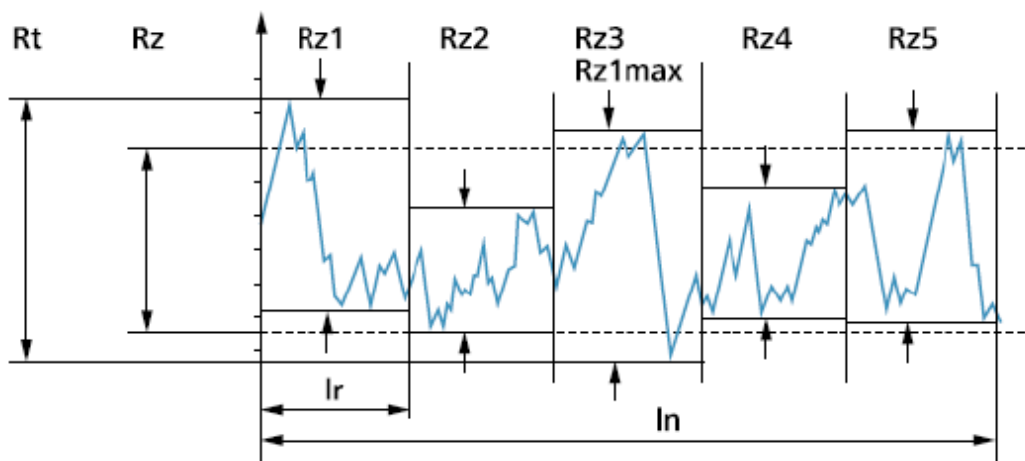
4.3.1 Drsnost povrchu

Je jedním z parametrů pro hodnocení jakosti povrchu. Vztahuje se na ni norma ČSN EN ISO 4287 vymezující definice, termíny a parametry pro určování struktury povrchu profilovou metodou. Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a je jedním z parametrů, které se určují z aritmetického středu absolutních odchylek profilu drsnosti od střední čáry profilu uvnitř základní délky. [6]



Obr. 36 Průměrná aritmetická úchylka profilu [6]

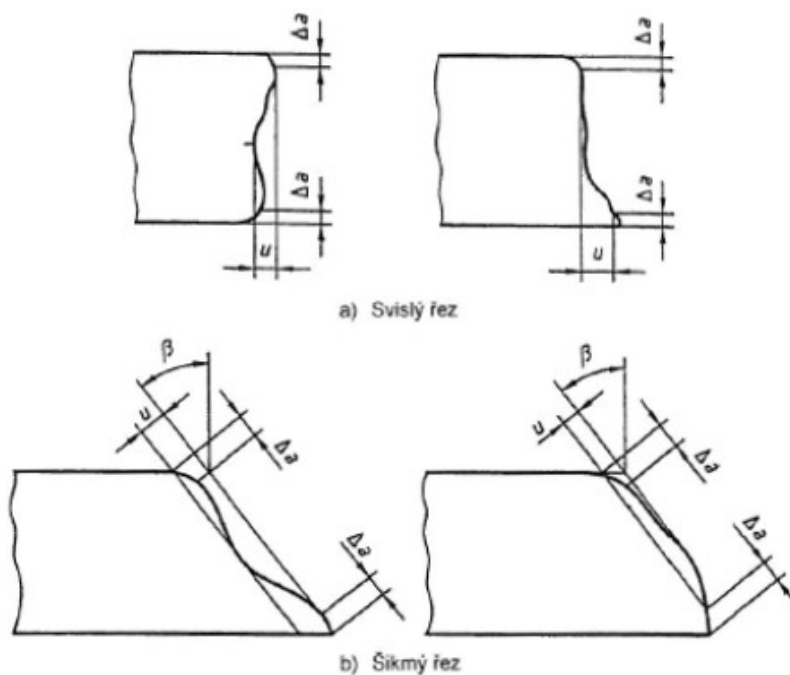
Následující parametr je střední hloubka profilu, což je parametr, který je dán aritmetickým průměrem jednotlivých hloubek drsnosti pěti za sebou následujících délkách. U neperiodických povrchů závisí vyhodnocená délka měřeného profilu na parametru R_a a ten je nutné předem odhadnout. [6]



Obr. 37 Střední hloubka drsnosti [6]

4.3.2 Úchylka kolmosti, úchylka úhlu „u“

Pojednává o vzdálenosti mezi dvěma rovnoběžnými přímkami (které se dotýkají řezaného povrchu) a mezi které je vepsán profil povrchu řezu. U svislých řezů svírají tyto přímky s povrchem řezaného materiálu 90° . Pro posouzení úchylky kolmosti je nejdůležitější její nejvyšší naměřená hodnota pouze v omezené oblasti povrchu řezu. V závislosti na tloušťce materiálu je ze všech tepelných metod dělení u laserového řezání docíleno nejmenšího úkosu. [4]



Obr. 38 Úchylky úhlů a kolmosti [18]

a – Tloušťka řezu

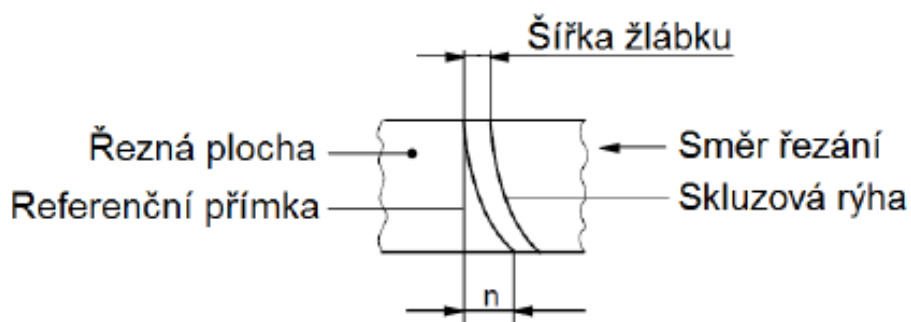
Δa – Zmenšení tloušťky řezu

β – Úhel šikmého řezu

u – Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu

4.3.3 Skluz „n“

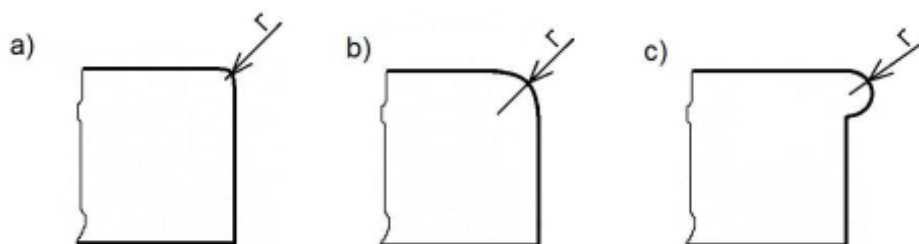
Při laserovém řezání vznikají typické skluzové rýhy, které jsou při nízkých či optimálních řezacích rychlostech kolmé na plochu výrobku. Při vyšší řezné rychlosti dochází k zalamování drážek proti směru řezání. Skluz můžeme vyjádřit jako průmět vzdálenosti mezi dvěma body rýhy ve směru řezání. [16]



Obr. 39 Měření skluzu [16]

4.3.4 Natavení horní hrany, r

Veličina, která charakterizuje tvar horní hrany řezu. Dle normy ČSN EN ISO 9013 může hrana být ostrá, natavená, nebo převíslá. [16]



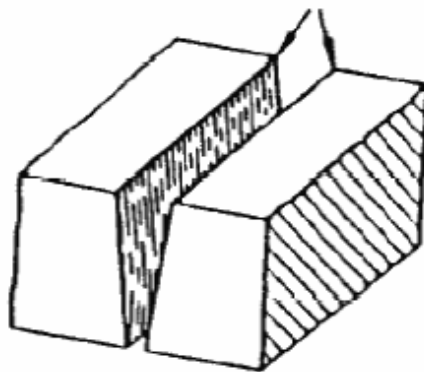
Obr. 40 Natavení horní hrany řezu a) ostrá hrana b) natavená hrana c) převíslá hrana [16]

4.4 Vady při laserovém řezání

Vady obecně chápeme jako nepravidelnosti nebo úchytky od stanoveného tvaru, polohy řezů a od vlastností předepsaných technickými normami. Norma ČSN EN 12584 definuje termíny možných vad řezů vykonaných laserem, které jsou vyvolány v přímé souvislosti s řezáním. [16]

4.4.1 Šířka řezné spáry

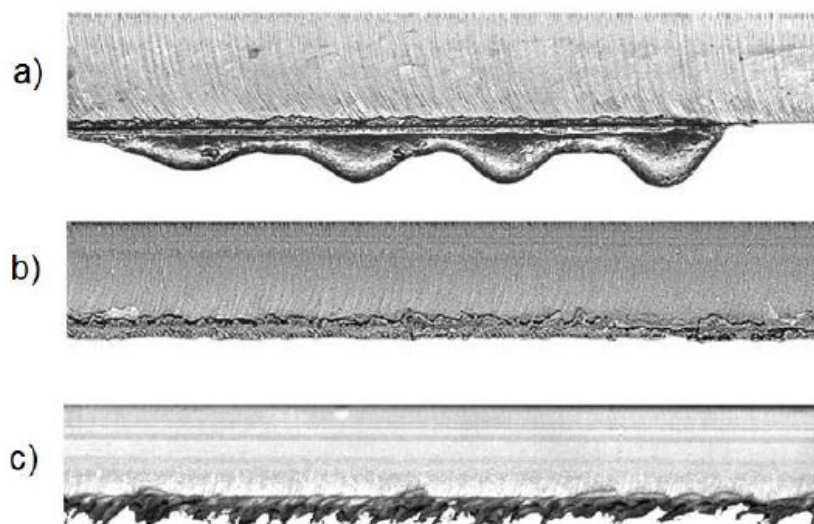
Tuto hodnotu ovlivňuje rychlost posuvu. Pokud je posuv příliš rychlý, tak se oblouk nestihne natáhnout až ke spodní hraně. Tím je zapříčiněno, že je v horní části řezu odevzdáno více tepla. Způsobuje to širší spáru na horní straně materiálu a zkosení řezné spáry do tvaru V. V opačném případě při nízkých rychlostech dojde k nadbytku vneseného tepla do materiálu, zvláště u spodní hrany materiálu. Výsledkem je nadměrně široká spára, rozšířená v dolní části a rozšířená tepelně ovlivněná oblast. [4]



Obr. 41 Rozšíření řezné spáry [6]

4.4.2 Výskyt otřepů na spodní straně

Může nastat při nesprávném nastavení parametrů. Jedná se o silně přilnavé kovové výčnělky, nebo o ulpělou struskovitou hmotu. Nachází se na dolní straně řezu, nebo na ploše řezu, zpravidla však ve spodní oblasti plochy. [4]



Obr. 42 Druhy otřepů a) perlovitý b) struskovitý c) špičatý [16]

5. Experimentální část práce

Cílem tohoto experimentu je komparace dvou kusů obrobené součásti na CNC frézovacím centru, univerzální rovinné frézce a laserovém řezacím zařízení. Porovnávány jsou parametry jako rozměrová přesnost, kvalita povrchu, čas obrábění a cenová politika výrobců. Vybraná součást byla volně navržena tak, aby zvolené konstrukční prvky poskytl experimentu náhled na rozdílné drsnosti povrchů, délkové rozměry a přesnosti konvenční a nekonvenční technologie. Frézování součásti probíhalo ve společnosti AŽD Praha s.r.o., kde byl vyroben jeden vzorek z poskytnutého materiálu na CNC frézovacím centru a univerzální rovinné frézce. Řezání laserem součásti bylo vyrobeno ve společnosti SLOUPSKÝ s.r.o. při použití konstrukční oceli S 235JR. Rozměrové měření proběhlo ve společnosti AŽD Praha s.r.o. a měření drsnosti povrchů proběhlo v budově CPIT TL-1 Fakulty strojní VŠB-TUO.

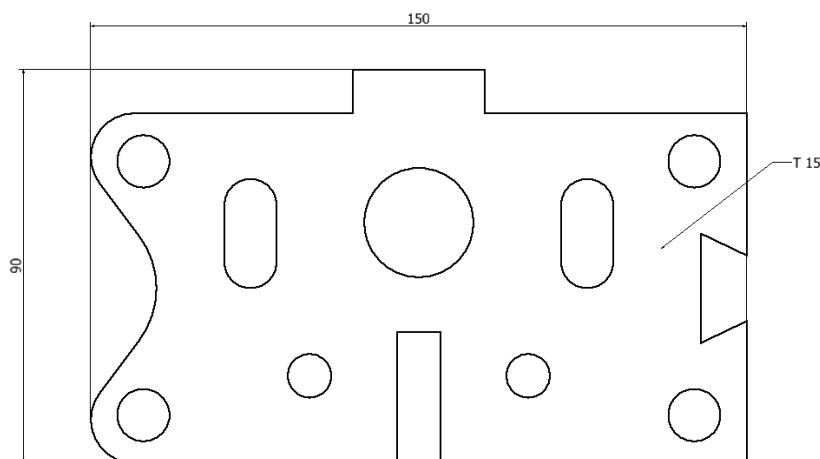
Materiál součásti

Zvolený materiál pro tento experiment byla konstrukční ocel S235 JR dle ČSN EN 100025-2. Ocel je vhodná ke svařování, používá se tedy pro svařované konstrukce, výrobu ohraňovaných profilů, šroubované konstrukce a jako součásti tepelných a energetických zařízení.

Chemické složení	C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cu [%]	N [%]
	≤ 20	≤ 1,4	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,55	≤ 0,012
Mechanické vlastnosti	Mez pevnosti Rm [MPa]	Mez kluzu Re [MPa]	Teplota tavení [°C]	Hustota [kg·m ⁻³]	Kontrakce [%]	Tažnost [%]
	340	215	1450-1510	7850	31	21

Tab. 1 Mechanické vlastnosti a chemické složení materiálu S235JR [6]

Náhled součásti



Obr. 43 Náhled vložky KD-0204-2020

Technical Drawing Specifications:

- Top View (A-A):**
 - Total Width: 150 mm
 - Total Height: 80 mm
 - Hole Positions (from left edge): 12, 24.5, 23.5, 30 ± 0.1, 23.5, 24.5, 12 mm.
 - Hole Positions (from top edge): 12, 20, 20, 10 ± 0.3, 20, 38, 12 mm.
 - Holes: 2x Ø10 +0.3/-0.0, 4x Ø12 +0.3/-0.0, 2x Ø25 +0.4/-0.0, 1x Ø25 +0.4/-0.0.
 - Fillet Radius: R20
 - Chamfer: 2xR10
- Side View (B-B):**
 - Thickness: 15 ± 0.1 mm
 - Surface Finish: Ra 3.2
 - Internal Features: 10.5 ± 0.03, 15 ± 0.0, 25 ± 0.0, 32.5 mm.
- Table:**

Hmotnost 1,31 kg		1:1		Tolerance: ČSN ISO 8015	
Přesnost: ČSN ISO 2768 m-k					
Kotvící deska					
Materiál S235 JR					
Číslo kresby KD_0204_2020					
Stav 1					

5.1 Návrh výroby součásti konvenční technologií

Jako konvenční technologii jsem při výrobě vzorku zvolil frézování. První vzorek byl vyroben na vertikálním obráběcím centru Mazak VTC-300C-2 a na univerzální rovinné frézce TOS FA3A-U z polotovaru Tyč plochá 100x20 dle ČSN 42 5522-1. Polotovar byl nařezán na 153 mm na pásové pile. Obrobek byl upnut ve zvolených polohách do svěráku a příslušnými nástroji obroben.



Obr. 44 Vertikální obráběcí centrum Mazak VTC-300C-2

Technické údaje		
		Mazak VTC-300C-2
Osa X	mm	1740
Osa Y	mm	760
Osa Z	mm	660
Typ CNC		Mazatrol Fusion 640m
Délka stolu	mm	2000
Šířka stolu	mm	760
Max. přípustná váha	kg	1400
Počet nástrojů v zásobníku		30
Výkon motoru vřetena	kW	18,5
Kužel vřetene		CAT 40
Max. rychlost hřídele	ot/min	10000
Délka stroje	mm	5400
Šířka stroje	mm	3458
Výška stroje	mm	3442
Hmotnost	kg	10500

Tab. 2 Technické údaje obráběcího centra Mazak VTC-300C-2



Obr. 45 Univerzální rovinná frézka TOS FA3A-U

Technické údaje		
		TOS FA3A-U
Osa X	mm	500
Osa Y	mm	300
Osa Z	mm	300
Max. nosnost stolu	kg	250
Výkon motoru	kW	4
Kužel vřetene		ISO 40
Otáčky vřetene	ot/min	45-2800
Délka stroje	mm	1600
Šířka stroje	mm	2000
Výška stroje	mm	1700
Hmotnost	kg	1550

Tab. 3 Technické údaje univerzální rovinné frézky TOS FA3A-U



Obr. 46 Použité nástroje při frézování



Obr. 47 Upnutí obrobku ve svěráku



Obr. 48 Frézování rybinové drážky na frézce TOS FA3A-U

VZO

TECHNOLOGICKÝ POSTUP

List: 1 / 1

Výkres / Index	Alt.	Název	Postavení							
999990987M		KOTVÍČÍ DESKA	Díl							
technologická	minimální	maximální	Kmen. středisko	Platí od / do	Modifikace	Stav	Změna od / do	Stav	Počet operací	
Dávky : 1	1	1	230	8.3.2017 0:0	10	R	VZO/17/EP/0002	R	5	
Poznámka:			Autor postupu		Schválí					
			Křeček Pavel, VZO ÚTPV							

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / SVK	
Materiál - název	Výkres / atributy		Spotřební množství		MJ		% ztrát	
TYC OC VALC PLOCH 11375.0	0133203200000 425522.10		100X20		2,5 kg		0	
Příznaky	Pracoviště	Středisko	Rozměr přilezu	Ks	Kspolot	Přid. up.	Prořez	Hmotnost polot.
+++++								
Poznámka :	Klíč: 61443							
Materiál - název	Výkres / atributy		Spotřební množství		MJ		% ztrát	
R390-11 T3 08M-PM 4340	9206960160124 SANDVIK		28681		0,3 ks		0	
Příznaky	Pracoviště	Středisko	Rozměr přilezu	Ks	Kspolot	Přid. up.	Prořez	Hmotnost polot.
+++++								
Poznámka :	Klíč: 219409							
1	M5964	PILA PASOVA	230	0,10 hod. 3		1,0		
	ŘEZAT			0,02433 hod. 3		1,00		
	Řezat tyč na délku 153mm			Posuvné měřidlo digi				
	Samokontrola rozměrů a vzhledu - s uvolněním (dle SM-82/01).							
2	M5156	Centrum fréz. VTC-300c	230	1,00 hod. 6		1,0		
	SEŘÍDIT PROGRAM			0,00 hod. 6		1,00		
	Seřadit program KD 0204-2020							
3	M5156	Centrum fréz. VTC-300c	230	0,00 hod. 5		1,0		
	FRÉZOVAT DLE PROGRAMU			0,22 hod. 5		1,00		
	Frézovat dle programu							
	1.kus předložit ÚŘJ, ost. kontr. samokontrolou (dle SM-82/01).							
4	M5163	FREZKA	230	0,50 hod. 5		1,0		
	FRÉZOVAT			0,32083 hod. 5		1,00		
	Frézovat:			FREZA R245-100Q32-18M				
	na tloušťku 15mm			FREZA MONOLIT				
	drážku 30x10			FREZA UHL.CEL. VALC.STOPKA				
	rybinu 25x13			Posuvné měřidlo digi				
	zafrézovat hrany u výstupku 30x10							
	1.kus předložit ÚŘJ, ost. kontr. samokontrolou (dle SM-82/01).							
5	M9421	ZAMECNIK-D	230	0,15 hod. 3		1,0		
	ODJEHLIT			0,07867 hod. 3		1,00		
	Odjehlít po frézování.			PILNIK LEHKY OBDELNIKOVY				
				PILNIK USECOVY LEHKY				
				SKRABAK BN 1010 NUZ				

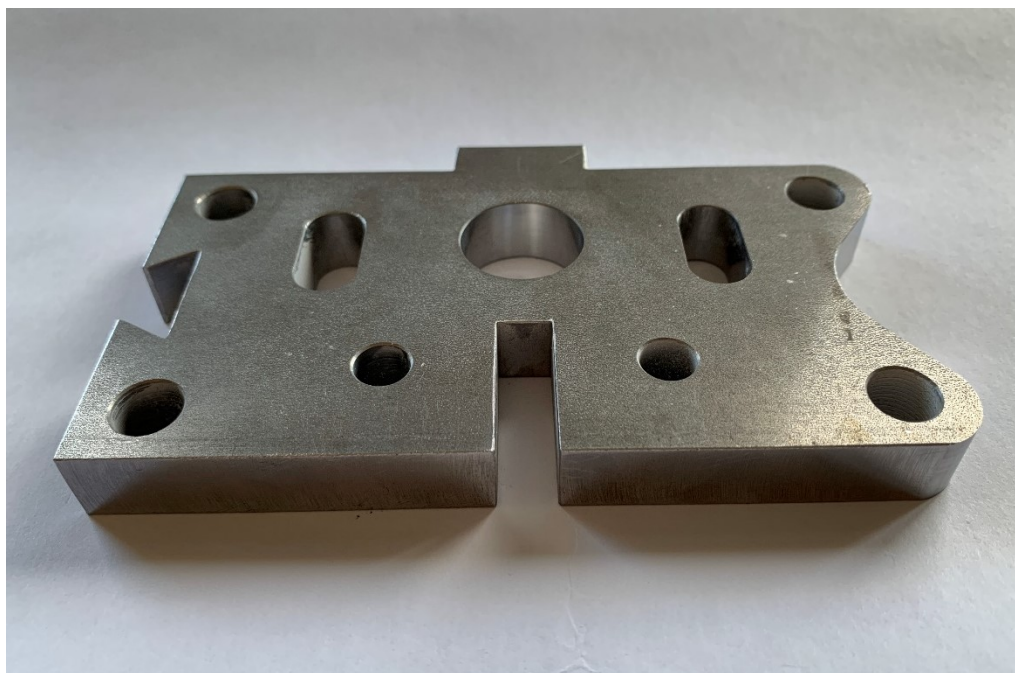
Vytiskl: Meštlánek Roman, VZO ÚTPV

Dne: 6.5.2020

Obr. 49 Technologický postup výroby frézováním zvolené součásti

Použité nástroje při frézování

- Vrták Ø10, Ø12
- Stopková fréza Ø10, Ø16
- Fréza čelní s VBD Ø80
- Kotoučová fréza Ø125x 10
- Tvarová fréza rybinová

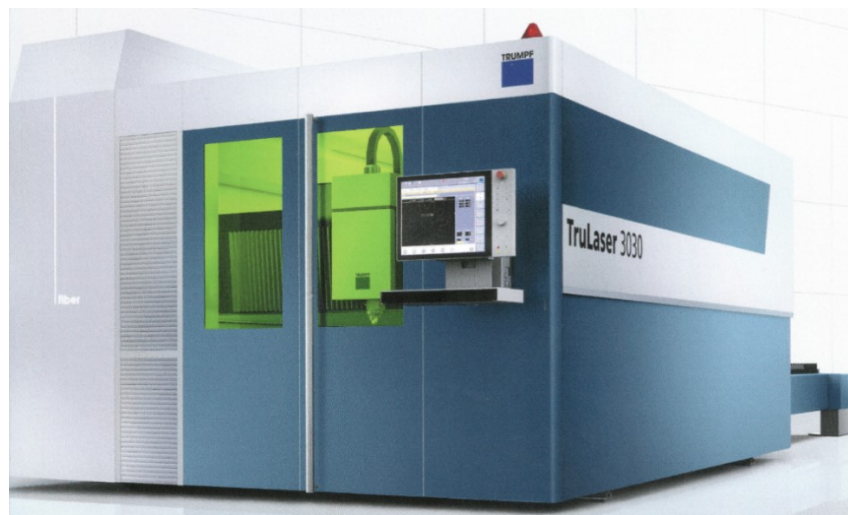


Obr. 50 Frézovaný vzorek

Řezání polotovaru pásovou pilou na zvolenou délku 153 mm trvalo dle technologického postupu 6 minut. Vytvoření programu na stroji Mazak VTC-300C-2 zabralo dle technologického postupu 1 hodinu a následné frézování 13 minut. Pro docílení ostrých rohů bez rádiusu v rybinové drážce a drážce 30x10 mm byla zvolena tvarová fréza rybinová 15x25 mm a pro drážku 30x10 mm byla vybrána kotoučová fréza o průměru 125 mm a šířce 10 mm. S těmito nástroji se frézovalo na univerzální rovinné frézce TOS FA3A-U. Čas přípravy na výrobu včetně upínání a následného frézování trval 30 minut. Kvalita povrchu vzorku (spodní i horní strana) nebyla pro funkčnost součásti podstatná, takže po frézování tyto plochy nebyly dále zpracovány. Po frézování následovalo odjehlení otvorů kvůli otřepům vzniklým po nástrojích. K tomuto odjehlení bylo použito pilníků obdélníkového, úsečového a odjehlovacího otočného nože. V součtu tato operace trvala 9 minut.

5.2 Návrh výroby součásti nekonvenční technologií

Zvolena byla technologie řezání pomocí laserového paprsku. Vzorek byl řezán pomocí laserového obráběcího stroje TruLaser 3030 L49 Fiber. Jako asistenční plyny lze použít kyslík, dusík i atmosférický vzduch. Při tomto experimentu při řezání oceli S235JR byl z důvodu tloušťky materiálu využíván kyslík. Rozměr polotovaru tabule byl formát 3000x1500x15. Po vyřezání vzorku bylo nutné odstranit ořep ze spodní strany součásti, což bylo provedeno na pásové brusce.

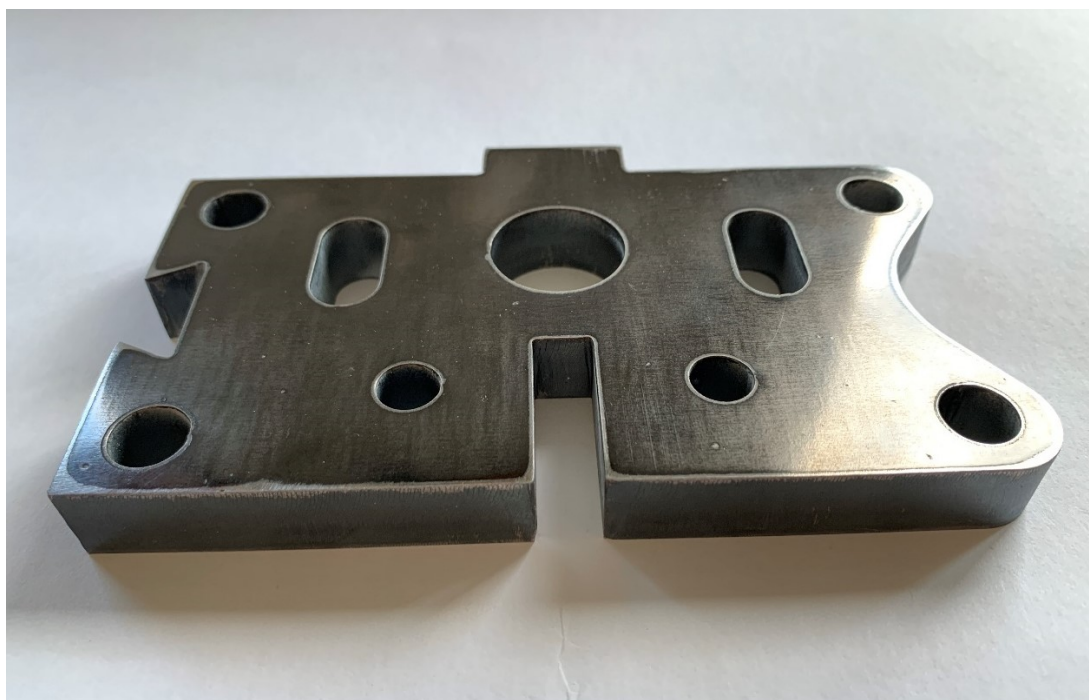


Obr. 51 Trumpf TruLaser 3030 L49 Fiber

Technické údaje		
Zpracovatelné formáty		TruLaser 3030 L49
Osa X	mm	3000
Osa Y	mm	1500
Osa Z	mm	115
Obrobek		
Max. hmotnost	kg	900
Max. rychlost		
simultánně	m/min	140
Přesnost		
Poziční odchylka Pa	mm	0,05
Střední poziční odchylka Ps max	mm	0,03
Laserový modul		TruDisk 4001
Max. výkon	W	4000
Vlnová délka	μm	1,03
Max. síla plechu		
Konstrukční ocel	mm	25
Ušlechtilá ocel	mm	20
Hliník	mm	20
Měď	mm	8
Mosaz	mm	8
Příkon		
Průměrný výkon ve výrobě	kW	15

Tab. 4 Technické údaje laseru Trumpf TruLaser 3030 L49

Výroba jednoho kusu do tabule formátu 3000x1500 o hmotnosti 532 kg je na první pohled složitá, avšak při vhodné manipulaci za pomoci jeřábu lze tabuli umístit na stůl laseru do 10 minut. Ze seřizovacího plánu laseru N3591 (viz Obr. 53) lze zjistit, že celková doba běhu stroje pro řezání vzorku byla 141 sekund. Do tohoto času není započítána výměna stolu, výměna řezací trysky, nastavení ohniska ani měření řezné výšky. Při výpočtu nákladů na výrobu vzorku jsou ovšem všechny tyto úkony zohledněny. V seřizovacím plánu jsou všechny důležité informace o řezané součásti. Délka řezání je 1053,11 mm a v součásti je devět otvorů, tudíž deset propalů včetně obvodového propalu. Výkon laseru při řezání vzorku byl 4 kW, řezná spára 0,64 mm a průměr řezací trysky 1,4 mm. Jako asistenční plyn byl použit kyslík o vysoké čistotě 3.5 (99,95 %). Povrch součásti byl po obrobení kvůli otřepům na spodní straně broušen na pásové brusce. V otvorech si lze také všimnout zápalů, které byly vytvořeny najížděním paprsku z propalu, což bylo zapříčiněno nedostatečným snížením výkonu v závislosti na rychlosti. Přiložená tabulka laserové technologie (viz Obr. 55) pro tloušťku plechu 15 mm udává parametry přednastavené společností Trumpf, které jsou pro daný typ laseru a sílu materiálu nejvhodnější, a obrobek po vyřezání vykazoval nejlepší kvalitu a přesnost. Částečně lze tyto hodnoty upravovat jak přímo na stroji, tak při programování řezání. Do parametrů technologie se zasahuje z velké míry jen pokud má materiál dodaný od výrobce odlišné chemické složení, nebo pokud se řezají vícelegované materiály.



Obr. 52 Vzorek vyřezaný na laseru

**Serizovací plán: N3591**

28.04.2020

Pracoviště L49 - 4000

Pož. termín dokonč.:

Celková doba behu: 00:02:21 [h:min:s]

Proraz: 100 %

Počet dílu: 1

Počet tabulí: 1

Laserové technologické tabulky

Číslo tabulky	Rezná spára	Ohnisk. vzdálenost cokky	Průměr trysky	Max. výkon laseru	Nastavená míra	Plyn
ST150MD0-O2B0-30-2	0,64	7,90	EAA14	4000	-99,00	1

Druh plynu: 1 = kyslík, 2 = dusík, 4 = stlačený vzduch

Technologické tabulky

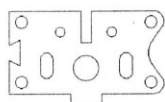
Číslo	Způsob zapichování	Způsob rezní	Druh obrysu
ST150MD0-O2B0-30-2	MEKCE	REDUKOVANE	VELKY
ST150MD0-O2B0-30-2	MEKCE	NORMALNI	VELKY

NC programy

Hlavní program	Opak.	Výrobní balík - surová tabule plechu Rozměry	C. šarže	Výrobní balík - hmotnost	Výrobní balík - proraz	Doba trvání
N3591_1	1	ST0M1500----3000x1505 (1.0038) 3000,00 x 1505,00 x 15,00 mm		531,64 kg	99,79 %	00:02:21 [h:min:s]

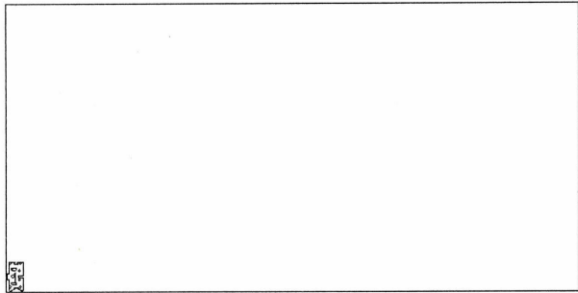


Díly

#	C. dílu:	GeoFile:	Výrobní zakázka	Ks
1	P33438_03	P33438_03.geo	N3591_1	1

Informace o jednotlivém dílu / zakázce

C. dílu: P33438_03
Ozn. dílu: KD_0204_2020
C. výkresu
GeoFile: P33438_03.geo
Rozměry: 150,00 x 89,95 mm
C. zakázky: OR8450
Identifikace zakázky:
Zákazník:

Ks: 1
Hmotnost díl: 1,13 kg
Čas obrábění dílu: 00:02:21
Plocha: 0,009591 m²
Délka rezní: 1053,11 mm

Výrobní zakázka				
 <div style="font-size: 8px; margin-top: 5px;">  N3591_1.1.mt User 28.04.2020 </div>		<p>Výrobní zakázka: N3591_1</p> <p>Hlavní program: N3591_1</p> <p>Opak.: 1</p> <p>Surovina: 1.0038</p> <p>Surový materiál: STOM1500---</p> <p>Výrobní balík - surová tabule plechu: STOM1500----3000x1505 STOM1500----3000x1505</p> <p>Rozměry 3000,00 x 1505,00 x 15,00 mm</p> <p>Minimální přírez: 99,85 x 166,90 mm</p> <p>Výrobní balík - hmotnost: 531,64 kg</p> <p>Výrobní balík - prerez: 99,79 %</p> <p>Doba trvání: 00:02:21 [h:min:s]</p> <p>Délka rezní: 1053,11 mm</p>		
				
#	C. zakázka:	C. dílu:	GeoFile:	Ks
1	OR8450	P33438_03	P33438_03.geo	1

Výrobní pokyny	
Mikromustky, menitelné na stroji	nenastaveno
Jméno obsazení oper. lišty	Standardní stroj, každý druhý nastaven
Vzdálenost operných bodu na operné lište	38 mm
Vzdálenost operných lišt NEBO odstranovaných lišt	67 mm
Preferovat obrábění	bez
Obrysy naprogramovány s dráhovou korekcí	
Poznámky:	
Oznacení NCP:	
Info o strojení:	

Obr. 54 Seřizovací plán laseru N3591



**Nazev regulace: ST150MD0-O2B0-30-
2:TC35-DK-0-99999-0-99999-12-
1.0038-1-100-1-400-200:1P**

Material: St37-150 Stroj: TC35 Tloušťka materialu: 15.00

strana 1/3
Vytvořeno 06.05.2020
17:37:08
Verze 2.0

Obecné údaje

Nazev regulace	ST150MD0-O2B0-30	Druh plynu	Label.sauerstoff
Material	St37-150	Stroj	TC35
Tloušťka materialu	15.00	Info	BrightLine, Standard

Prehled

		<u>maly obrys</u>		<u>stredni obrys</u>		<u>velky obrys</u>	
Zapichovani		Ano		Ano		Ano	
Rezani		Ano		Ano		Ano	
Najizdeni		Ano		Ano		Ano	
Odjizdeni		Ne		Ne		Ne	
Zaobleni		Ano		Ano		Ano	
Polohovani		Ano		Ano		Ano	
Loop		Ne		Ne		Ne	
Odparovani		Ne		Ne		Ne	
		<u>Min</u>	<u>Max</u>	<u>Min</u>	<u>Max</u>	<u>Min</u>	<u>Max</u>
Plocha	mm2	19.63	78.54	19.63	78.54	78.54	100000.00

Zapichovani

		<u>maly obrys</u>	<u>stredni obrys</u>	<u>velky obrys</u>
Zpusob zapichovani		Mekce	Mekce	Mekce
Cyklus mereni		Ano	Ano	Ano
Polomer strikaciho kruhu	mm	2.40	2.40	4.90

Rezani

		<u>maly obrys</u>	<u>stredni obrys</u>	<u>velky obrys</u>
Typ rezani		Normalne	Normalne	Normalne
Presne zastaveni		Ne	Ne	Ne
Zmena posunutí drahy		Ano	Ano	Ano
Regulace vzdalenosti		Ano	Ano	Ano
Feed Forward		Ne	Ne	Ne
Vnejsi obrys s Microjoint		Ne	Ne	Ne
Delka	mm	0.00	0.00	0.00
Vnitřní obrys s Microjoint		Ne	Ne	Ne
Delka	mm	0.00	0.00	0.00
Konec paprsku pred koncem obrysu		Ne	Ne	Ne
Delka	mm	0.00	0.00	0.00
Korekce drahy		Ano	Ano	Ano
Max. rozsireni trysky	%	0.00	0.00	0.00

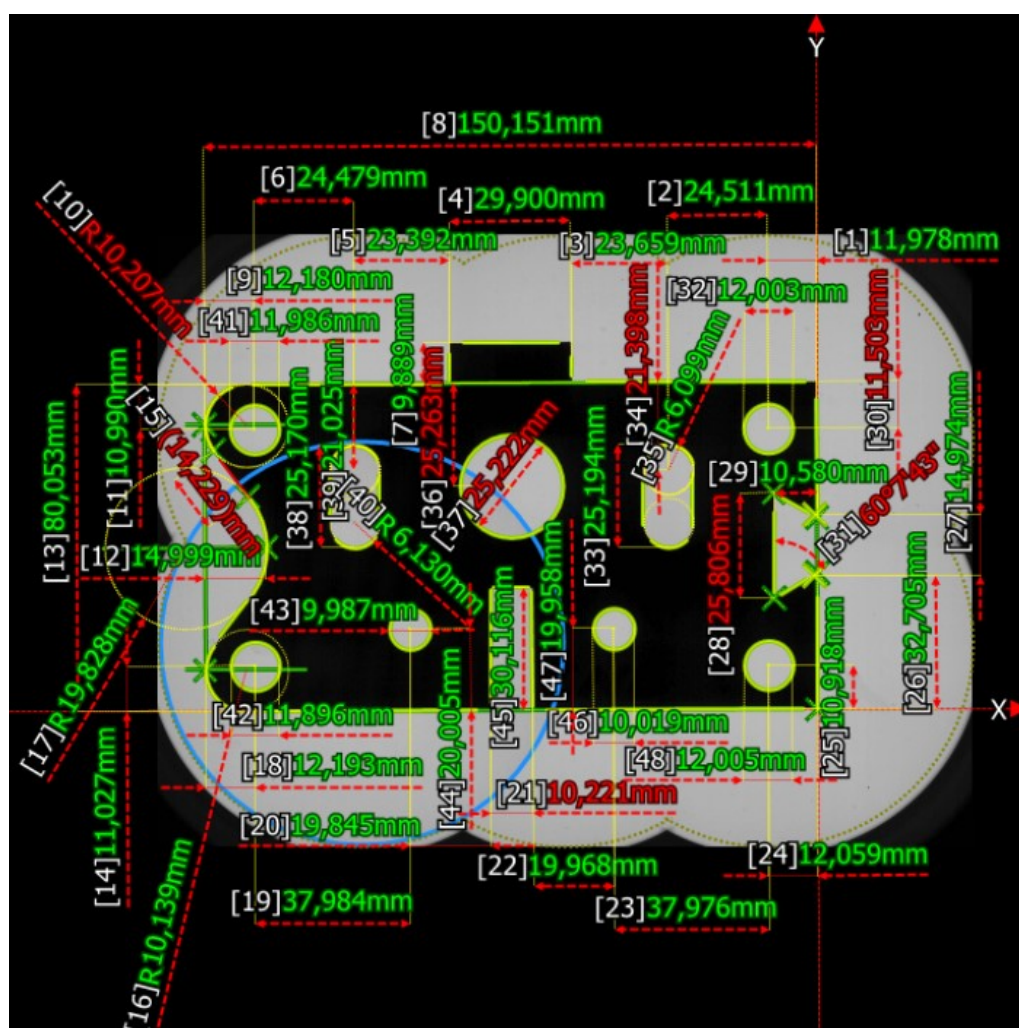
Obr. 55 Technologická tabulka laseru Trumpf TruLaser 3030 L49 Fiber pro tloušťku 15 mm

6. Technicko-ekonomické zhodnocení

6.1 Porovnání rozměrové přesnosti součástí

Rozměrová přesnost byla prováděna ve společnosti AŽD Praha s.r.o. na digitálním měřicím systému Keyence IM-7000. Pomocí tohoto zařízení byly změřeny oba vzorky. U obou vzorků bylo naměřeno 48 rozměrových hodnot, které byly porovnány s výkresem a na základě tolerančních úchylek rozměrů vyhodnoceny. V grafickém znázornění jsou naznačeny kóty s rozměry, které jsou očíslovány, a pokud je výsledná hodnota zelené barvy, tak je v tolerančním rozpětí a tudíž vyhovuje. Pokud je hodnota barvy červené, tak nevyhovuje. Dále jsou přiloženy měrné protokoly, kde jsou všechny stanovené rozměry, skutečné rozměry (naměřené) a horní i spodní úchytky. Pokud je rozměr v poli tolerance je označen OK, pokud není je označen NG.

6.1.1 Měření frézovaného vzorku



Obr. 56 Grafické znázornění výsledku měření frézované součásti



AZD - Merový protokol

	Program name	KD_0204_2020_kotvici_deska
	Measurement Date and Time	12.5.2020 8:13:39
	Name	
	Item name	
	Measurement device	KEYENCE IM Series(IM-J1L2NQ2UGNGN)
	Overall result	NG

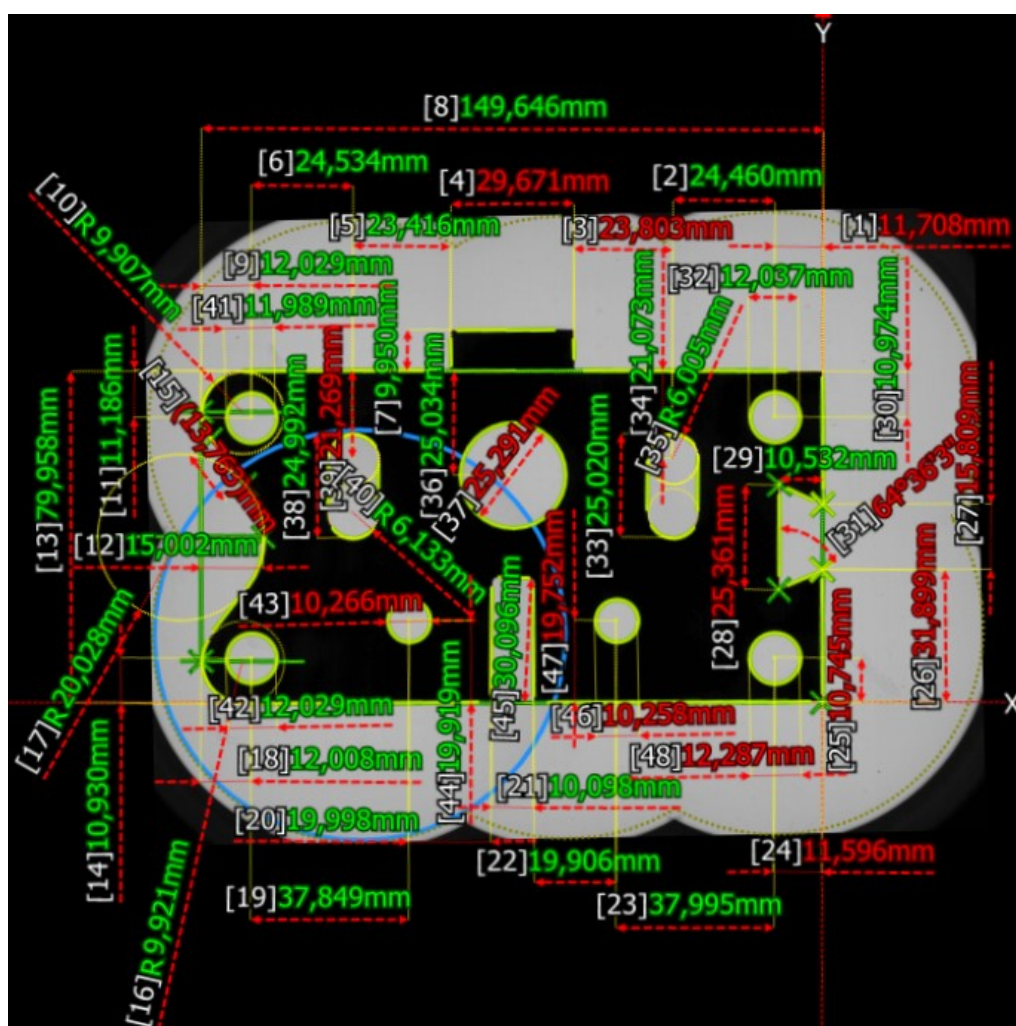
[Výsledky měření]

Č.	položka měření	hodn. měř.	jednotky	stanovená hodn.	horní limit	Spodní limit	rozl.
1	L_12_1	11,978	mm	12,000	0,200	-0,200	OK
2	L_24_5_1	24,511	mm	24,500	0,200	-0,200	OK
3	L_23_5_1	23,659	mm	23,500	0,200	-0,200	OK
4	L_30_1	29,900	mm	30,000	0,300	-0,300	OK
5	L_23_5_2	23,392	mm	23,500	0,200	-0,200	OK
6	L_24_5_2	24,479	mm	24,500	0,200	-0,200	OK
7	L_10	9,889	mm	10,000	0,200	-0,320	OK
8	L_150	150,151	mm	150,000	0,500	-0,500	OK
9	L_12_2	12,180	mm	12,000	0,200	-0,200	OK
10	R10_1	10,207	mm	10,000	0,200	-0,200	NG
11	L_11_1	10,990	mm	11,000	0,200	-0,200	OK
12	L_15_1	14,999	mm	15,000	0,200	-0,200	OK
13	L_80	80,053	mm	80,000	0,300	-0,300	OK
14	L_11_2	11,027	mm	11,000	0,200	-0,200	OK
15	L_15_2	14,229	mm	15,000	0,200	-0,200	NG
16	R10_2	10,139	mm	10,000	0,200	-0,200	OK
17	R20	19,828	mm	20,000	0,200	-0,200	OK
18	L_12_3	12,193	mm	12,000	0,200	-0,200	OK
19	L_38_1	37,984	mm	38,000	0,300	-0,300	OK
20	L_20_1	19,845	mm	20,000	0,200	-0,200	OK
21	L_10_2	10,221	mm	10,000	0,200	-0,200	NG
22	L_20_2	19,968	mm	20,000	0,200	-0,200	OK
23	L_38_2	37,976	mm	38,000	0,300	-0,300	OK
24	L_12_4	12,059	mm	12,000	0,200	-0,200	OK
25	L_11_3	10,918	mm	11,000	0,200	-0,200	OK
26	L_32_5	32,705	mm	32,500	0,300	-0,300	OK
27	L_15_3	14,974	mm	15,000	0,200	-0,200	OK
28	L_25_1	25,806	mm	25,000	0,200	-0,200	NG
29	L_10_5	10,580	mm	10,500	0,200	-0,200	OK
30	L_11_4	11,503	mm	11,000	0,200	-0,200	NG
31	uhel_65	60°7'43"		65°0'0"	0°20'0"	-0°20'0"	NG
32	prm_12_1	12,003	mm	12,000	0,200	-0,200	OK
33	L_25_2	25,194	mm	25,000	0,200	-0,200	OK
34	L_21_1	21,398	mm	21,000	0,200	-0,200	NG
35	R6_1	6,099	mm	6,000	0,200	-0,200	OK
36	L_25_3	25,263	mm	25,000	0,200	-0,200	NG
37	prm_25	25,222	mm	25,000	0,200	-0,200	NG
38	L_25_4	25,170	mm	25,000	0,200	-0,200	OK
39	L_21_2	21,025	mm	21,000	0,200	-0,200	OK
40	R6_2	6,130	mm	6,000	0,200	-0,200	OK
41	prm_12_2	11,986	mm	12,000	0,200	-0,200	OK
42	prm_12_3	11,896	mm	12,000	0,200	-0,200	OK
43	prm_10_1	9,987	mm	10,000	0,200	-0,200	OK
44	L_20_3	20,005	mm	20,000	0,200	-0,200	OK
45	L_30_2	30,116	mm	30,000	0,300	-0,300	OK
46	prm_10_2	10,019	mm	10,000	0,200	-0,200	OK
47	L_20_4	19,958	mm	20,000	0,200	-0,200	OK
48	prm_12_4	12,005	mm	12,000	0,200	-0,200	OK

Tab. 5 Měrný protokol frézované součásti

Z měrného protokolu lze usoudit, že ze 48 měřených hodnot jich bylo vyhodnoceno 8 negativně. Příčinou může být chyba programátora v programování stroje, či nesprávné upnutí do svěráku. Není vyloučeno ani opotřebení použitých nástrojů, nebo jejich špatné upnutí, což by také vedlo k větším rozměrovým úchytkám. Mírné házení vřetene by mohlo znamenat vyšší naměřené hodnoty u drážky 30x10 mm (rozměr číslo 21) i u rybinové drážky 25x15x10,5 mm (rozměr číslo 28). Nicméně odchylky od tolerančních rozpětí nejsou v takovém rozsahu, aby součást postrádala funkčnost.

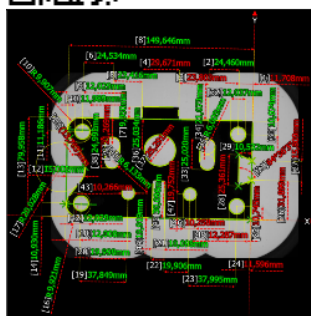
6.1.2 Měření vzorku řezaného laserem



Obr. 57 Grafické znázornění výsledku měření součásti řezané laserem



AZD - Merový protokol

	Program name	KD_0204_2020_kotvici_deska
	Measurement Date and Time	12.5.2020 8:21:37
	Name	
	Item name	
	Measurement device	KEYENCE IM Series(IM-J1L2NQ2UGNGN)
	Overall result	NG

[Výsledky měření]

Č.	položka měření	hodn. měř.	jednotky	stanovená hodn.	horní limit	Spodní limit	rozl.
1	L_12_1	11,708	mm	12,000	0,200	-0,200	NG
2	L_24_5_1	24,460	mm	24,500	0,200	-0,200	OK
3	L_23_5_1	23,803	mm	23,500	0,200	-0,200	NG
4	L_30_1	29,671	mm	30,000	0,300	-0,300	NG
5	L_23_5_2	23,416	mm	23,500	0,200	-0,200	OK
6	L_24_5_2	24,534	mm	24,500	0,200	-0,200	OK
7	L_10	9,950	mm	10,000	0,200	-0,320	OK
8	L_150	149,646	mm	150,000	0,500	-0,500	OK
9	L_12_2	12,029	mm	12,000	0,200	-0,200	OK
10	R10_1	9,907	mm	10,000	0,200	-0,200	OK
11	L_11_1	11,186	mm	11,000	0,200	-0,200	OK
12	L_15_1	15,002	mm	15,000	0,200	-0,200	OK
13	L_80	79,958	mm	80,000	0,300	-0,300	OK
14	L_11_2	10,930	mm	11,000	0,200	-0,200	OK
15	L_15_2	13,763	mm	15,000	0,200	-0,200	NG
16	R10_2	9,921	mm	10,000	0,200	-0,200	OK
17	R20	20,028	mm	20,000	0,200	-0,200	OK
18	L_12_3	12,008	mm	12,000	0,200	-0,200	OK
19	L_38_1	37,849	mm	38,000	0,300	-0,300	OK
20	L_20_1	19,998	mm	20,000	0,200	-0,200	OK
21	L_10_2	10,098	mm	10,000	0,200	-0,200	OK
22	L_20_2	19,906	mm	20,000	0,200	-0,200	OK
23	L_38_2	37,995	mm	38,000	0,300	-0,300	OK
24	L_12_4	11,596	mm	12,000	0,200	-0,200	NG
25	L_11_3	10,745	mm	11,000	0,200	-0,200	NG
26	L_32_5	31,899	mm	32,500	0,300	-0,300	NG
27	L_15_3	15,809	mm	15,000	0,200	-0,200	NG
28	L_25_1	25,361	mm	25,000	0,200	-0,200	NG
29	L_10_5	10,532	mm	10,500	0,200	-0,200	OK
30	L_11_4	10,974	mm	11,000	0,200	-0,200	OK
31	uhel_65	64°36'3"		65°0'0"	0°20'0"	-0°20'0"	NG
32	prm_12_1	12,037	mm	12,000	0,200	-0,200	OK
33	L_25_2	25,020	mm	25,000	0,200	-0,200	OK
34	L_21_1	21,073	mm	21,000	0,200	-0,200	OK
35	R6_1	6,005	mm	6,000	0,200	-0,200	OK
36	L_25_3	25,034	mm	25,000	0,200	-0,200	OK
37	prm_25	25,291	mm	25,000	0,200	-0,200	NG
38	L_25_4	24,992	mm	25,000	0,200	-0,200	OK
39	L_21_2	21,269	mm	21,000	0,200	-0,200	NG
40	R6_2	6,133	mm	6,000	0,200	-0,200	OK
41	prm_12_2	11,989	mm	12,000	0,200	-0,200	OK
42	prm_12_3	12,029	mm	12,000	0,200	-0,200	OK
43	prm_10_1	10,266	mm	10,000	0,200	-0,200	NG
44	L_20_3	19,919	mm	20,000	0,200	-0,200	OK
45	L_30_2	30,096	mm	30,000	0,300	-0,300	OK
46	prm_10_2	10,258	mm	10,000	0,200	-0,200	NG
47	L_20_4	19,752	mm	20,000	0,200	-0,200	NG
48	prm_12_4	12,287	mm	12,000	0,200	-0,200	NG

Tab. 6 Měrný protokol součásti řezané laserem

Ze vzorku řezaného na laseru bylo ze 48 měřených hodnot vyhodnoceno negativně 16. V tomto případě mohlo nesprávné rozměry zapříčinit více aspektů. První může nastat v nesprávném naprogramování součásti, potažmo výkresu v křivkách. Při řezání na laseru je také nutné brát v úvahu postupné zahřívání materiálu, kdy vznikají specifická pnutí v materiálu, čímž dochází k jistým deformacím, které nepříznivě ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti materiálu.

Dále při řezání zvláště větších tlouštěk vzniká úkos na řezné hraně výpalku. V tomto případě, ačkoliv nebyl úkos měřen, lze usuzovat kolmost do 2-3 mm od horní strany vzorku, a poté vznik úkosu přibližně 1-2°. Na spodní straně vzorku by byly pravděpodobně naměřeny jiné hodnoty.

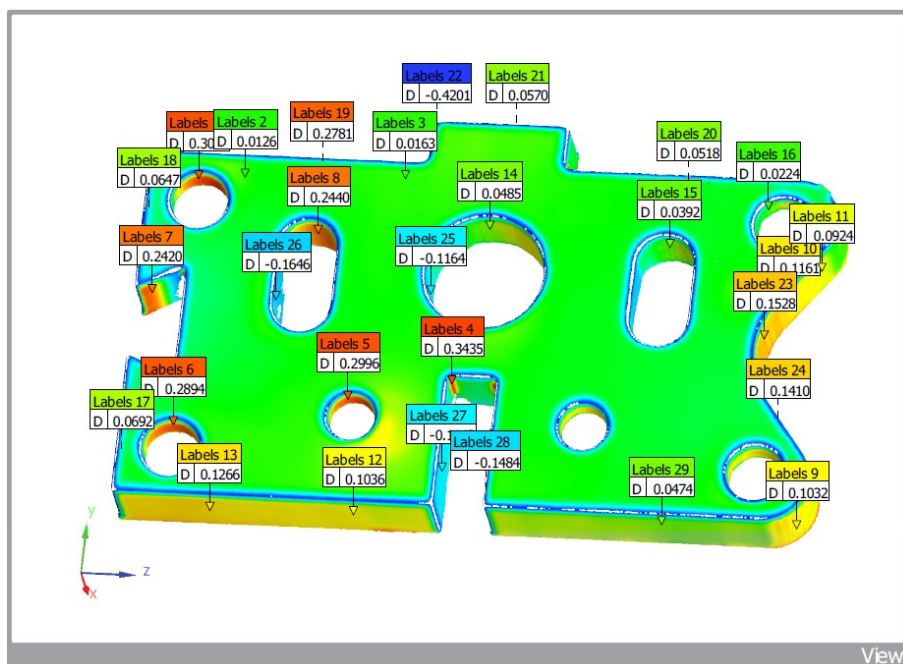
Rozměr číslo 27 (viz Tab. 6) je hodnota mezi ostrými rohy pod úhlem 65° a je mimo stanovenou hodnotu o 0,809 mm. Tento problém nastal v technologii řezání a nedostatečném snížení výkonu stroje vzhledem k rychlosti řezání. Natavené rohy součásti se tedy upálily a rozměr nabyl hodnoty. Rozměry součásti může částečně korigovat operátor přímo na stroji pomocí posunutí řezné spáry. Řezná spára lze posouvat do a vně obrobku, takže pokud operátor u prvního kusu série po měření zjistí nevyhovující rozměry, může je upravit.

6.1.3 Porovnání výsledků rozměrových měření

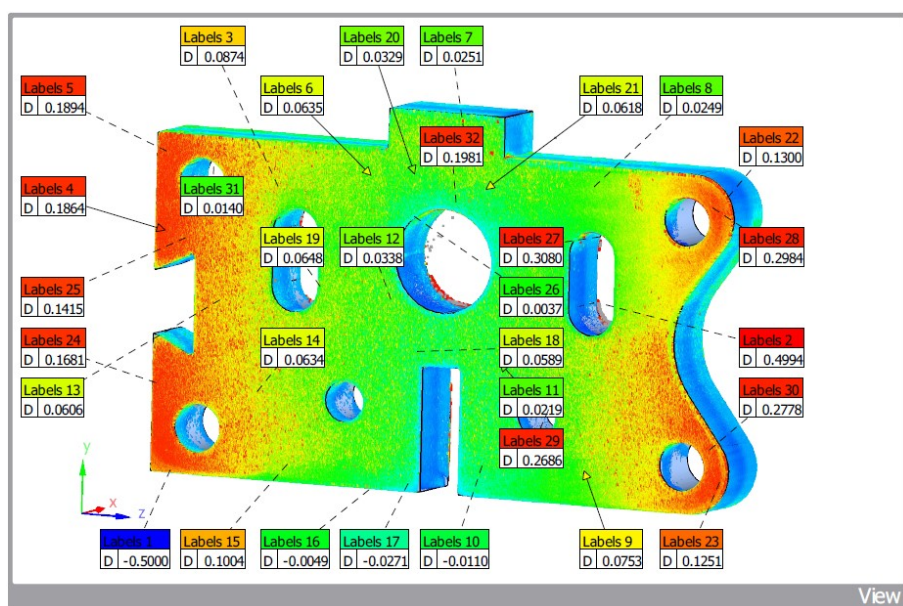
Kvůli odlišnostem a jednotlivým výhodám konvenčních a nekonvenčních technologií se dalo předpokládat, že vzhledem k rozměrům bude frézovaná součást mnohem přesnější než součást řezaná laserem. Tento předpoklad se provedeným experimentem potvrdil. Poměr nevyhovujících rozměrů byl 8 pro frézovaný vzorek a 16 pro vzorek řezaný laserem. Pokud by součást měla menší toleranční rozpětí, například pro přesná pouzdra, přesné kolíky nebo závity, tak by bylo vhodnější volit konvenční technologie. V tomto případě však většina rozměrů vyhověla.

Počet rozměrů vyhovujících / nevyhovujících tolerančním mezím		
	Frézovaný vzorek	Vzorek řezaný laserem
Vyhovující rozměry	40	32
Nevyhovující rozměry	8	16

Tab. 7 Porovnání rozměrů po obrábění konvenční a nekonvenční technologií



Obr. 58 Grafické znázornění vzorku obrobeneho frézováním



Obr. 59 Grafické znázornění vzorku obrobeneho laserem

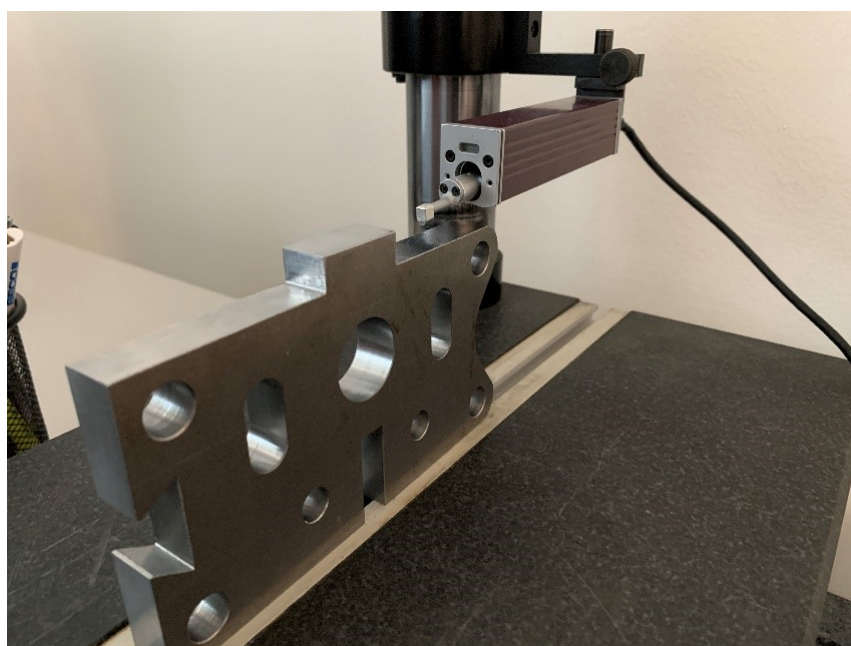
Na závěr je přiloženo také měření, které bylo provedeno v areálu VŠB-TUO na Fakultě strojní v budově CPIT TL-1. Měření bylo realizováno na portálovém 3D měřícím CNC stroji Wenzel LH 65. K měření byl poskytnut 3D model, který byl načten do stroje a porovnán s naměřenými hodnotami. V grafickém znázornění (viz obrázek 58, 59) lze pomocí barevného rozlišení vidět body a plochy, které se buďto blíží (zelená barva) nebo vzdalují (červená barva) zadaným hodnotám. Opět je možno vidět rozdíl mezi frézovaným výrobkem a výrobkem řezaným na laseru. Rozměry naměřené z laserového vzorku oproti frézovanému vzorku od osy součásti nabývají rozdílu vůči vloženému 3D modelu.

6.2 Srovnání drsnosti povrchů

Drsnost povrchů byla měřena dotykovým drsnoměrem Mitutoyo SJ-210 při použití filtru Gauss $\lambda_c=0,8$. Toto zařízení bylo poskytnuto VŠB-TUO Fakultou strojní v budově CPIT TL-1. U každého vzorku bylo provedlo 5 měření, přičemž pro každé měření byla zvolena odlišná strana vzorku pro dosažení přesnějších výsledků.



Obr. 60 Dotykový drsnoměr Mitutoyo SJ-210



Obr. 61 Detail měření drsnosti hrany frézované součásti

Drsnost povrchu obvodové hrany při frézování		
Měření č.	Největší výška profilu	Střední aritmetická úchylka profilu
	Rz	Ra
1	5,465	0,851
2	3,485	0,652
3	1,941	0,311
4	3,948	0,591
5	4,101	0,599

Tab. 8 Drsnost povrchu obvodové hrany při frézování

Drsnost povrchu řezné hrany při obrábění laserem		
Měření č.	Největší výška profilu	Střední aritmetická úchylka profilu
	Rz	Ra
1	16,241	2,571
2	13,838	2,361
3	14,275	2,401
4	17,331	2,739
5	16,437	2,452

Tab. 9 Drsnost povrchu řezné hranu při obrábění laserem

Z dosažených výsledků lze konstatovat, že při frézování vzniká mnohem menší profil drsnosti, a tudíž frézovaná plocha vykazuje přesnější a kvalitnější výsledky. Drsnost řezné hrany po obrobení laserem byla v průměru $Ra=2,5$, což dle výkresu splňuje kritérium $Ra=3,2$. Frézovaná součást měla obvodovou hranu s drsností v průměru $Ra=0,5$. Pokud by byly vyžadovány přesné otvory, např. pro hřídele či kolíky s tolerancí v řádech setin milimetru, tak by obrobek řezaný na laseru oproti frézování nesplňoval konstrukční kritéria. Tento problém nastává v drsnosti, která může při menších otvorech nebo profilech mít jiný rozměr v jednom prvku součásti. V tomto případě lze řezaný obrobek vrtat na vrtačce nebo upnout do CNC obráběcího centra a dané otvory a plochy dofrézovat či vysoustružit.

	Průměrná největší výška profilu Rz	Průměrná střední aritmetická úchylka profilu Ra
Frézování	3,788	0,601
Řezání laserem	15,624	2,505

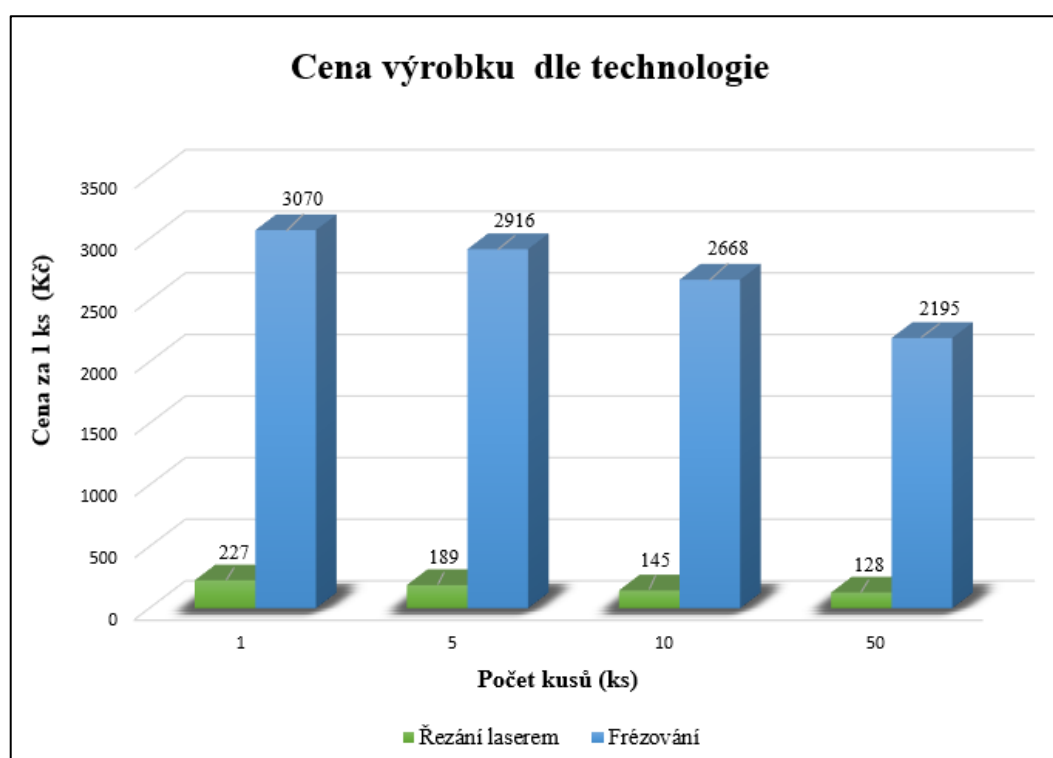
Tab. 10 Průměrné drsnosti obrobených hran součástí

6.3 Porovnání ceny výroby součástí

V obou společnostech byla poptána výroba součástí v sériích 1, 5, 10 a 50 kusů. Frézovaná součást byla ve všech sériích mnohonásobně dražší než součást řezaná laserem.

Při frézování lze s rostoucím počtem kusů uvažovat o zhotovení přípravku, do kterého by se součást upnula, a provedlo by se více operací naráz. Volba vhodnějších nástrojů by eventuálně zvýšila produktivitu výroby. Tyto kroky by vedly ke snižování ceny za kus.

Při řezání laserem můžeme při výrobě více než jednoho kusu rozdělit cenu stejných úkonů přípravy výroby (manipulace, programování) mezi více kusů, tudíž se výrobní náklady jednoho kusu poníží (viz Obr. 62).



Obr. 62 Porovnání cen dle technologií

Z hlediska ceny je tedy výhodnější pro výrobu všech vybraných sérií zvolit nekonvenční technologii řezání laserem.

Závěr

Tato bakalářská práce se věnovala srovnání výroby vybrané součásti konvenční a nekonvenční technologií. K porovnání byla zvolena výroba vzorku frézováním a řezáním laserem. Posuzovanými parametry vzorků byly rozměrová přesnost, drsnost povrchu a ceny technologií.

Z hlediska rozměrové přesnosti byl frézovaný vzorek přesnější než vzorek řezaný na laseru. Ze 48 měřených rozměrů bylo u frézovaného vzorku vyhodnoceno pouze 8 negativních rozměrů. Naproti tomu u vzorku z laseru bylo ze 48 měřených rozměrů 16 nevyhovujících, což je v porovnání s frézovanou součástí dvakrát více.

Pro vyhodnocení drsnosti vzorků bylo na každém vzorku provedeno 5 měření. U frézovaného vzorku vyšla průměrná největší výška profilu Rz 3,788, kdežto u vzorku řezaném na laseru vyšla tato hodnota 15,624. Menší drsnost povrchu tedy byla naměřena u frézovaného vzorku.

Posledním hodnoceným parametrem byla cena součásti. Ceny součástí byly poptány ve zmíněných společnostech pro série 1, 5, 10 a 50 kusů. Cena frézovaného dílu byla při každé výrobní sérii mnohonásobně vyšší oproti dílu řezanému na laseru. S vyššími sériemi se cena dílů postupně snižovala u obou zvolených technologií.

Co se týče doby výroby, u frézovaného vzorku se tato doba pohybovala kolem 2 hodin, zatímco u laserem řezaného vzorku byla tato doba podstatně kratší, a to 30 minut. Délka doby výroby frézovaného vzorku byla dána dlouhou přípravou výroby (řezání polotovaru, programování a upínání obrobku).

Závěrem lze tedy konstatovat, že největší výhodou u součásti řezané laserem je nízká cena, nevýhodou však zůstává menší přesnost. Frézovaná součást je oproti tomu přesnější, má estetičtější vzhled, ale je mnohem dražší. V dnešní době, kdy je stále více upřednostňována cena nad kvalitou, je z hlediska výroby častěji volena metoda řezání laserem. Z hlediska porovnávaných technologií výroby dané součásti a zvážení všech výše uvedených okolností a posuzovaných parametrů je tedy vhodnější pro výrobu této součásti zvolit nekonvenční technologii řezání laserem.

Seznam použité literatury

1. **Brychta, Josef, a další.** *Technologie II 2. Díl.* Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. 978-80-248-1822-1.
2. **Sadílek, Marek.** *Nekonvenční metody Obrábění I.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2016. 978-80-248-3943-1.
3. **Brychta, Josef, a další.** *Technologie II 1. Díl.* Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. 978-80-248-1641-8.
4. **Zlámal, Tomáš.** Vliv řezných parametrů na kvalitu řezu po laserového řezání. *Diplomová práce.* Ostrava : VŠB Ostrava, 2011.
5. **Plevka, Vojtěch.** Analýza možností laserového řezání. *Diplomová práce.* Brno : VUT Brno, 2013.
6. **Trunda, Václav.** Hodnocení kvality povrchu po laserovém řezání. *Bakalářská práce.* Ostrava : autor neznámý, 2017.
7. **Kachtík, Lukáš.** Typy laserů. <http://lasery.wz.cz/typy.html>. [Online] [Citace: 11. 2 2020.]
8. **Řasa, Jaroslav a Zuzana, Kerečaninová.** Nekonvenční metody obrábění - 4. Díl. <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>. [Online] 2008. [Citace: 10. 2 2020.]
9. **Kusala, J.** Laser a jeho využití, Cesta k objevu. <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k12.htm>. [Online] [Citace: 12. 2 2020.]
10. **Benko, Bernard, a další.** *Laserové technológie.* Bratislava : Slovenská technická univerzita, 2000. 80-227-1425-9.
11. **Sadílek, Marek.** *Nekonvenční metody Obrábění II.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2016. 978-80-248-3943-1.
12. **Maturita.cz.** Zpracování materiálu pomocí laseru. <http://www.maturita.cz/referaty/referat.asp?id=1358>. [Online] [Citace: 19. 3 2020.]
13. **Barták, Jiří, a další.** *Technologie svařování a zařízení.* Plzeň : Česká svářečská společnost ANB, 2014.

14. **Maňková, Ildikó.** *Progresívne technologie.* Košice : Technická univerzita Košice, 2000. 80-7099-430-4.
15. **Tonkovič, Miroslav.** Analýza materiálu pro laserové řezání. *Diplomová práce.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2014.
16. **Zelený, Radek.** Stroje pro nekonvenční metody obrábění. *Bakalářská práce.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2014.
17. **Hoško, Miroslav.** Hodnocení tvrdosti povrchu volné řezné hrany při použití plazmové technologie. *Bakalářská práce.* Ostrava : VŠB Ostrava, 2015.
18. **Norma ČSN EN ISO 9013.** Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu, říjen 2003.
19. **Lintech spol. s.r.o.** Laser podle aplikace. <https://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-aplikace/laserove-gravirovani/>. [Online] [Citace: 20. 3 2020.]
20. **Norma ČSN EN 12584.** Vady při řezání kyslíkem, laserem, plasmou - terminologie, duben 2001.